

Einfluss organischer Düngung auf Ertrag, symbiotische
N₂-Fixierung und Nährstoffaufnahme von Saatplatterbse
(*Lathyrus sativus* L.), Ackerbohne (*Vicia faba* L.) und Rotklee
(*Trifolium pratense* L.) sowie auf Ertrag eines nachfolgenden
Winterweizens (*Triticum aestivum* L.)

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum agriculturalium
(Dr. rer. agr.)

im Fach Acker- und Pflanzenbau

eingereicht an der Lebenswissenschaftlichen Fakultät
 der Humboldt-Universität zu Berlin

von Dipl.-Ing. (FH), Guido Lux

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät
Prof. Dr. Richard Lucius

1. Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. Frank Ellmer

2. Gutachter: Prof. Dr. Knut Schmidtke

3. Gutachter: Prof. Dr. Heinrich Scherer

Tag der mündlichen Prüfung: 11.11.2015

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission

Vorsitzender: Prof. Dr. Dieter Kirschke

Prof. Dr. Christof Engels

Prof. Dr. Roland Hoffmann-Bahnsen

Dr. Bärbel Kroschewski

Dr. Klaus-Peter Götz

Dr. Thomas Döring

Dr. Johann Bachinger

Zusammenfassung:

Einfluss organischer Düngung auf Ertrag, symbiotische N₂-Fixierung und Nährstoffaufnahme von Saatplatterbse (*Lathyrus sativus* L.), Ackerbohne (*Vicia faba* L.) und Rotklee (*Trifolium pratense* L.) sowie auf Ertrag eines nachfolgenden Winterweizens (*Triticum aestivum* L.)

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zu untersuchen, ob sich mit der Düngung von Stroh, Gehölzhäcksel, frischem Pferdemist und Grüngutkompost die Ertragsleistung und Nährstoffaufnahme von Leguminosen sowie der Folgefrucht Winterweizen steigern lässt. Darüber hinaus sollte die Aufnahme von düngebürtigem Kohlenstoff durch Rotklee mittels ¹³C-angereichertem Stroh quantifiziert werden.

Die Verfügbarkeit von Kalium, teilweise auch von Schwefel und Molybdän, wurde vor allem nach der Düngung von Grüngutkompost und von Pferdemist für die untersuchten Leguminosen verbessert, während nach der Düngung von Gehölzhäcksel und Stroh keine signifikanten Effekte auf die Nährstoffaufnahme der Pflanzen festgestellt werden konnten. Die scheinbare Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs durch die Leguminosen lag in Abhängigkeit von der Düngung zwischen 0 und 9 % (Gehölzhäcksel < Grüngutkompost < Pferdemist < Stroh). Nur nach der Düngung von Pferdemist zu Saatplatterbse und Ackerbohne verringerte sich der Anteil an symbiotisch fixiertem Luftstickstoff am Spross-N gegenüber der Kontrolle, nicht jedoch die symbiotisch fixierte N-Menge.

Der N_{min}-Vorrat im Boden in einer Tiefe von 0 bis 30 cm war unter Ackerbohne und Rotklee ca. 40 Tage nach der Düngung und Einarbeitung von Gehölzhäcksel gegenüber den Vergleichsvarianten und der Kontrolle deutlich vermindert. Ein Einfluss der durch die Düngung bedingten temporären N-Festlegung im Boden auf den Anteil an fixiertem Luftstickstoff am Spross-N konnte bei keiner der untersuchten Leguminosen festgestellt werden. Der nachfolgende Winterweizen reagierte in einem Jahr mit signifikant höherem Kornertrag auf die Düngung von Grüngutkompost zu Ackerbohne und erhöhtem Rohproteingehalt im Korn auf die Düngung von Pferdemist zu Saatplatterbse.

Mit Hilfe von ¹³C-markiertem Stroh wurde im Freiland eine Assimilation von 0,5 % der mit dem Stroh gedüngten Kohlenstoffmenge durch Rotklee ermittelt.

Schlagworte: Organische Düngung, Nährstoff- und Kohlenstoffaufnahme, Leguminosen

Summary

Effect of organic fertilisation on symbiotic nitrogen fixation and nutrient uptake of chick-bea (*Lathyrus sativus* L.), faba bean (*Vicia faba* L.) and red clover (*Trifolium pratense* L.) as well as on yield of a succeeding winter wheat (*Triticum aestivum* L.)

The aim of this study was to examine, whether the application of wheat straw, pruning, horse manure and green compost improves the yield formation and nutrient uptake of legumes and the succeeding crop winter wheat. Furthermore it should be quantified the amount of carbon in red clover derived from the organic fertilizer by carbon dioxid assimilation.

An improved uptake of potassium, partially of sulphur and molybdenum for the legumes could be detected after the application of green compost and horse manure. No effects were found on plant nutrient uptake after the application of straw and pruning.

The apparent utilization of the applied nitrogen by organic fertilizer was 0 to 9 %, depending on the fertilization (pruning < green compost < horse manure < straw). The proportion of symbiotically fixed nitrogen decrease in faba bean and in chick-pea after manuring with horse manure compared with the control. However the total amount of symbiotically fixed nitrogen did not decreased.

The amount of mineral nitrogen in the soil (depth: 0 to 0,3 m) was significant reduced under faba bean and red clover, 40 days after application and incorporation of pruning. No effect on the symbiotic nitrogen fixation of the legumes was found because of the organic fertilizer induced temporary immobilization of nitrogen in this soil layer.

An increased grain yield was determined in the succeeding winter wheat after fertilizing green compost to faba bean and a higher content of crude protein in grain of the wheat was determined after fertilizing horse manure to chick-pea.

With the help of a ¹³C-tracer method it could be estimated, that about 0,5 % of the added carbon with straw was assimilated by red clover under field conditions.

Keywords: organic fertilization, nutrient and carbon uptake, legumes

Verzeichnis der Abbildungen	IV
Verzeichnis der Tabellen	VII
Verzeichnis der Abkürzungen	X
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Versuchsanstellung und Methodik.....	8
2.1 Versuchsstandort	8
2.2 Witterung im Versuchszeitraum	10
2.3 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführung	12
2.3.1 Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee 2008 bis 2011	12
2.3.2 Gefäßversuch im Gewächshaus zu Rotklee 2011	15
2.3.3 Gefäßversuch im Freiland zu Rotklee 2011 und 2012	16
2.4 Eingesetzte Düngemittel	17
2.4.1 Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee 2008 bis 2010	17
2.4.2 Rotklee 2011 und 2012	20
2.5 Pflanzenmaterial	22
2.5.1 Ertragsermittlung	22
2.5.2 Inhaltsstoffanalysen der Pflanzen und Düngemittel	24
2.5.3 Bestimmung der symbiotischen N ₂ -Fixierung	26
2.5.3.1 Einfache Differenzmethode.....	26
2.5.3.2 $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (natural ^{15}N abundance method)	27
2.5.4 Bestimmung des ^{15}N - und ^{13}C -Anreicherungsgrades	28
2.5.5 Berechnung der Stickstoffaufnahme aus der Strohdüngung mit ^{15}N -Markierung	29
2.5.6 Berechnung der Kohlenstoffaufnahme aus Strohdüngung mit ^{13}C -Markierung.....	30
2.6 Scheinbare Nährstoffausnutzung.....	31
2.7 Ernteindex.....	32
2.8 Bodenatmung	32
2.9 Bodenchemische Untersuchung	33
2.9.1 Bodenanalysen	33
2.9.2 N _{min} -Vorrat im Boden	34
2.10 Statistische Methoden.....	35

3	Ergebnisse	37
3.1	Saatplatterbse und Nachfrucht Winterweizen	37
3.1.1	Ertrag der Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras	37
3.1.2	N _{min} -Vorrat im Boden.....	40
3.1.3	Nährstoffgehalt und Nährstoffentzug der Saatplatterbse.....	42
3.1.4	N-Aufnahme der Saatplatterbse und der Referenzfrucht	46
3.1.5	Bodenatmung in Saatplatterbse	48
3.1.6	¹³ C-Isotopensignatur im Spross der Saatplatterbse	49
3.1.7	Ertrag und N-Aufnahme der Nachfrucht Winterweizen.....	50
3.2	Ackerbohne, Rotklee und Nachfrucht Winterweizen 2009 bis 2011	54
3.2.1	Ertrag der Ackerbohne und Referenzfrucht Spitzwegerich.....	55
3.2.2	Ertrag des Rotklees und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras	58
3.2.3	N _{min} -Vorrat im Boden.....	61
3.2.4	Nährstoffaufnahme	64
3.2.4.1	Nährstoffgehalteim Blatt der Ackerbohne.....	64
3.2.4.2	Nährstoffgehalt und Nährstoffentzug des Rotklees	68
3.2.5	N-Aufnahme der Ackerbohne und des Rotklees	74
3.2.6	Bodenatmung in Ackerbohne	79
3.2.7	¹³ C-Isotopensignatur in Ackerbohne und Rotklee	80
3.2.8	Ertrag und Spross-N des Winterweizens nach Ackerbohne und Rotklee	82
3.3	Düngung von ¹⁵ N- und ¹³ C-markiertem Stroh zu Rotklee.....	86
3.3.1	Gefäßversuch im Gewächshaus	86
3.3.2	Gefäßversuch im Freiland	93
3.3.2.1	Bodenatmung	93
3.3.2.2	Aufnahme von markiertem ¹³ C-Kohlenstoff	94
4	Diskussion	98
4.1	Verfügbarkeit von Kalium, Phosphor, Schwefel und Molybdän nach organischer Düngung	98
4.2	Effekte der Zufuhr hoher organischer Kohlenstoff- und Stickstoff-Mengen	119
4.3	Die Aufnahme von Kohlenstoff aus organischen Düngemitteln.....	132

4.3.1	Bodenatmung und düngerinduzierte Kohlenstoff-Aufnahme.....	133
4.3.2	Methodik zur Quantifizierung der Kohlenstoff-Aufnahme.....	137
4.4	Schlussfolgerungen	141
5	Zusammenfassung	146
5.1	Ertrag, Nährstoffaufnahme und symbiotische N ₂ -Fixierung der untersuchten Leguminosen.....	147
5.2	Ermittlung der Kohlenstoffassimilation aus organischen Düngemitteln.....	149
6	Literaturverzeichnis.....	150
Anhang		
Verzeichnis der Abbildungen im Anhang.....		186
Verzeichnis der Tabellen im Anhang.....		187
Erklärung.....		242
Danksagung.....		243

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Niederschlagshöhe im Versuchszeitraum (Monatsmittel) und langjähriges Monatsmittel (1981 bis 2010) am Standort Dresden-Pillnitz	10
Abb. 2: Temperaturverlauf (Monatsmittel) im Versuchszeitraum und langjähriges Mittel (1981 bis 2010) am Standort Dresden-Pillnitz	11
Abb. 3: Lufttemperatur und relative Luftfeuchteim Gewächshaus während der Durchführung des Gefäßversuches mit Rotklee im Zeitraum vom 26.01. bis 04.09.2011	12
Abb. 4: Einfluss der Düngung auf den Sprossertrag der Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras in den Jahren 2008 und 2009	39
Abb. 5: Einfluss der Düngung auf die Unkraut-Sprossmasse in Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009; zweifaktorielle Auswertung	40
Abb. 6: Einfluss der Düngung auf den CaCl_2 -extrahierbaren N_{\min} -Vorrat im Boden nach Ernte der Saatplatterbse und nach Ernte des nachfolgenden Winterweizens in den Jahren 2008/2009 und 2009/2010	41
Abb. 7: Einfluss der Düngung auf den Gehalt an Phosphor, Schwefel (a) und an Kalium und Molybdän (b) im Spross der Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009.....	43
Abb. 8: Einfluss der Düngung auf den Entzug an Phosphor, Schwefel (a) und an Kalium und Molybdän (b) mit dem Spross der Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009.....	44
Abb. 9: Einfluss der Düngung auf die Aufnahme an Stickstoff aus dem Boden und die symbiotische N_2 -Fixierung der Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras in den Jahren 2008 und 2009	47
Abb. 10: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf den Korn- und Strohertrag der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010	51
Abb. 11: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf die Aufnahme an Stickstoff der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010	53
Abb. 12: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf den Rohproteingehalt im Korn der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010	54

Abb. 13: Einfluss der Düngung auf den Korn- und Strohertrag der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010	56
Abb. 14: Einfluss der Düngung auf die Spross-TM der Unkräuter in Ackerbohne und von Spitzwegerich in den Jahren 2009 und 2010	57
Abb. 15: Einfluss der Düngung auf den Schnittgutertrag von Rotklee an 3 Schnittterminen und der Stoppelmasse nach dem letzten Schnitt in den Jahren 2009 und 2010	59
Abb. 16: Einfluss der Düngung auf den Sprossertrag des Welschen Weidelgrases zu drei Schnittterminen in den Jahren 2009 und 2010	60
Abb. 17: Einfluss der Düngung auf den Nmin-Vorrat im Boden unter Ackerbohne und nachfolgendem Winterweizen in den Jahren 2009/2010 (a) und 2010/2011 (b)	62
Abb. 18: Einfluss der Düngung auf den Nmin-Vorrat im Boden unter Rotklee und nachfolgendem Winterweizen in den Jahren 2009/2010 (a) und 2010 / 2011 (b).....	63
Abb. 19: Einfluss der Düngung auf den Gehalt an Phosphor und Schwefel in der Blatt-TM der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010	65
Abb. 20: Einfluss der Düngung auf den Gehalt an Kalium und Molybdän in der Blatt-TM der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010.....	67
Abb. 21: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Phosphor mit dem Schnittgut des ersten Schnittes und mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010	69
Abb. 22: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Schwefel mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010	70
Abb. 23: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Kalium mit dem Schnittgut des ersten Schnittes und mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010	72
Abb. 24: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Molybdän mit dem Schnittgut des ersten Schnittes und mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010	73
Abb. 25: Einfluss der Düngung auf die Menge an Stickstoff im Spross der Ackerbohne aus dem Boden und über symbiotische N ₂ -Fixierung und auf die N-Menge im Spross von Spitzwegerich in den Jahren 2009 und 2010	75

Abb. 26: Einfluss der Düngung auf die Menge an Stickstoff im Rotklee spross aus dem Boden und über symbiotische N ₂ -Fixierung und auf die N-Menge im Spross von Welschem Weidelgras in den Jahren 2009 und 2010	78
Abb. 27: Einfluss der Düngung der Vorfrucht Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) auf den Kornertrag der Folgefrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011.....	82
Abb. 28: Einfluss der Düngung der Vorfrüchte Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) auf die Spross-N-Menge in der Folgefrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011	83
Abb. 29: Einfluss der Düngung zu Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) auf den Rohproteingehalt in der Korn-TM der Folgefrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011.....	84
Abb. 30: Schnittgutertrag des Rotklee zu sechs Schnittterminen im Gefäßversuch nach Düngung von Stroh	87
Abb. 31: Einfluss der Strohdüngung und der ¹⁵ N-Markierung auf den δ ¹⁵ N-Wert im Schnittgut des Rotklee zu sechs Schnittterminen im Jahr 2011	88
Abb. 32: δ ¹³ C-Werte im Schnittgut des Rotklee nach Düngung mit nicht ¹³ C-markiertem und ¹³ C-markiertem Stroh zu sechs Schnittterminen im Gefäßversuch im Jahr 2011.....	90
Abb. 33: Schnittgutertrag des Rotklee zu vier Schnittterminen im Gefäßversuch nach Düngung von Stroh im Freiland.....	94
Abb. 34: δ ¹³ C-Werte im Schnittgut des Rotklee nach Düngung mit nicht ¹³ C-markiertem und ¹³ C-markiertem Stroh zu vier Schnittterminen im Freiland in den Jahren 2011 und 2012	95
Abb. 35: N _{min} -Vorrat im Boden in Abhängigkeit von der Düngung mit Grüngutkompost, Pferdemist und Gehölzhäcksel zu Ackerbohne und Rotklee in einer Tiefe von 0 bis 30 cm.....	120

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Korngrößenverteilung des Feinbodens und bodenphysikalische Kennwerte der Versuchsfläche am Versuchsstandort Dresden-Pillnitz.....	8
Tab. 2: Chemische Kennwerte des Bodens in einer Tiefe von 0 bis 30 cm am Versuchsstandort Dresden-Pillnitz im Zeitraum 2008 bis 2012	9
Tab. 3: Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagsmenge im lang-jährigen Mittel und im Versuchszeitraum 2008 bis 2010	11
Tab. 4: Arten, Sortenbezeichnung und Saatkichte der verwendeten Kulturen am Standort Dresden-Pillnitz in den Jahren 2008 bis 2012	13
Tab. 5: Eingesetzte Düngemittel zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2008 bis 2010	18
Tab. 6: Ausgebrachte Mengen an Stroh (FM), Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff und Isotopensignatur des Strohs im Gefäßversuch (Gewächshaus) zu Rotklee im Jahr 2011	21
Tab. 7: Ausgebrachte Mengen an Stroh (FM), Gehalte an Kohlenstoff und ¹³ C-Isotopensignatur des Strohs im Gefäßversuch (Freiland) zu Rotklee in den Jahren 2011 und 2012	22
Tab. 8: Einfluss der Düngung auf den Feldaufgang der Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009	38
Tab. 9: Scheinbare Nährstoffausnutzung (in Prozent der gedüngten Nährstoffmenge) durch Saatplatterbse nach mineralischer und organischer Düngung in den Jahren 2008 und 2009*	45
Tab. 10: Einfluss der Düngung auf den Anteil an boden- (N _{dfs}) und luftbürtigem (N _{dfa}) Stickstoff am Gesamtstickstoff im Spross der Saatplatterbse, Mittelwerte der Jahre 2008 und 2009.....	48
Tab. 11: Vergleich der Mittelwerte der Bodenatmung in Saatplatterbse nach organischer und mineralischer Düngung im Jahr 2008	49
Tab. 12: δ ¹³ C-Wert (natural abundance) in den ausgebrachten organischen Düngemitteln und im Spross der Saatplatterbse nach organischer Düngung in den Jahren 2008 und 2009	50
Tab. 13: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf den Ernteindex der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010.....	52
Tab. 14: Einfluss der Düngung auf den Feldaufgang der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010	55
Tab. 15: Einfluss der Düngung auf den Feldaufgang des Rotklees in den Jahren 2009 und 2010	58

Tab. 16: Scheinbare Nährstoffausnutzung durch Rotklee (in Prozent der gedüngten Nährstoffmenge) nach mineralischer und organischer Düngung in den Jahren 2009 und 2010*	74
Tab. 17: Einfluss der Düngung auf den Anteil an bodenbürtigem (N_{dfs}) und luftbürtigem Stickstoff (N_{dfa}) am Gesamtstickstoff im Spross der Ackerbohne, Mittelwerte der Jahre 2009 und 2010	76
Tab. 18: Einfluss der Düngung auf den Anteil an boden- (N_{dfs}) und luftbürtigem Stickstoff (N_{dfa}) am Gesamtstickstoff im Spross des Rotklee, Mittelwerte der Jahre 2009 und 2010	79
Tab. 19: Mittelwerte der Bodenatmung zu 4 (2009) bzw. zu 5 (2010) Terminen in Ackerbohne nach mineralischer und organischer Düngung in den Jahren 2009 und 2010	80
Tab. 20: $\delta^{13}C$ -Wert in den ausgebrachten Düngemitteln und Einfluss der Düngung auf den $\delta^{13}C$ -Wert in der Spross-TM der Ackerbohne	81
Tab. 21: $\delta^{13}C$ -Wert in den ausgebrachten Düngemitteln und Einfluss der Düngung auf den $\delta^{13}C$ -Wert in der Spross-TM des Rotklee	81
Tab. 22: Einfluss von Düngung zu Ackerbohne und Rotklee, Vorfrucht und Jahr auf den Ernteindex (%) der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011.....	86
Tab. 23: Anteil des Stickstoffs aus dem gedüngten Stroh im Schnittgut des Rotklee und Anteil des strohbürtigen Stickstoffs am Schnittgut-N des Rotklee (Gefäßversuch im Jahr 2011)	89
Tab. 24: Ergebnis der ein- und zweifaktoriellen Varianzanalyse und des multiplen Mittelwertvergleiches zum Einfluss der Strohdüngung und des Schnitttermines auf die $\delta^{13}C$ -Werte im Schnittgut des Rotklee im Gefäßversuch	91
Tab. 25: Anteil des Kohlenstoffs, der aus dem gedüngten Stroh aufgenommen wurde und Anteil an strohbürtigem Kohlenstoff am Schnittgut-C des Rotklee (Gefäßversuch im Jahr 2011).....	92
Tab. 26: Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse der Bodenatmung in Rotklee nach Strohdüngung in den Jahren 2011 und 2012.....	93
Tab. 27: Anteil an Kohlenstoff aus dem gedüngten Stroh im Schnittgut des Rotklee und Anteil von strohbürtigem Kohlenstoff am Kohlenstoff im Schnittgut des Rotklee im Jahr 2011 und 2012, Gefäßversuch im Freiland.....	96
Tab. 28: Gehalt an Kalium im Spross von Saatplatterbse, im Blatt von Ackerbohne, im Schnittgut von Rotklee des ersten Schnittes und im Spross von Rotklee in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 bis 2010	100

Tab. 29: Molybdängehalt der in den eigenen Untersuchungen geprüften Düngemittel im Vergleich zu Angaben anderer Autoren	117
Tab. 30: Scheinbare N-Ausnutzung von Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee und nachfolgendem Winterweizen, sowie von Welschem Weidelgras und Spitzwegerich in Abhängigkeit von der Düngung mit Grüngutkompost, Pferdemist, Stroh und Gehölzhäcksel	125

Verzeichnis der Abkürzungen

B	Bor
BBCH	Entwicklungsstadien der Pflanzen
BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratcentimeter
cm ³	Kubikcentimeter
CAL	Calciumazetatlactat-Auszug
C/N	Verhältnis Kohlenstoff zu Stickstoff
C/P	Verhältnis Kohlenstoff zu Phosphor
C _{org}	organisch gebundener Kohlenstoff
C _t	Gesamt-Kohlenstoff
dB	Lagerungsdichte des Bodens
dm	Dezimeter
dt	Dezitonnen
FA	Feldaufgang
fS	Feinsand
FK	Feldkapazität
FM	Frischmasse
fU	Feinschluff
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft
°C	Grad Celsius
gS	Grobsand
gU	Grobschluff
ha	Hektar
K	Kalium
kf	keimfähig
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
µS	Mikrosiemens
Mg	Magnesium
Mio.	Million
ml	Milliliter

mm	Millimeter
Mo	Molybdän
mS	Mittelsand
mU	Mittelschluff
N	Stickstoff
N _{Boden}	bodenbürtiger Stickstoff in der Pflanze (absolut)
N _{dfa}	Nitrogen derived from the atmosphere (prozentual)
N _{dfs}	Nitrogen derived from the soil (prozentual)
N _{fix}	symbiotisch fixierter Stickstoff in der Pflanze (absolut)
N _t	Gesamt-Stickstoff
n.b.	nichtbestimmt
nFK	nutzbare Feldkapazität
nFKWe	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes
NH ₄ ⁺	Ammonium
N _{min}	mineralischer Stickstoff (NO ₃ ⁻ -N und NH ₄ ⁺ -N)
NO ₃ ⁻	Nitrat
P	Phosphor
P-Wert	Irrtumswahrscheinlichkeit
s	Sekunde
S	Schwefel
S _{min}	mineralischer Schwefel
t	Tonne
T	Ton
TKM	Tausendkornmasse
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten

1 Einleitung und Problemstellung

Der ökologische Landbau strebt in seinem Grundverständnis einen weitestgehend geschlossenen innerbetrieblichen Stoffkreislauf im Sinne einer „wohlproportionierten“ Landbewirtschaftung, d.h. einen Gemischtbetrieb mit ausgewogenem Verhältnis der angebauten Kulturen und des Viehbesatzes an (BAEUMER 1986, KÖPKE 1994). Aufgrund des Exportes von tierischen und pflanzlichen Produkten aus dem Bewirtschaftungssystem, verbunden mit dem Entzug von Nährstoffen aus dem Boden, kann sich ein landwirtschaftlicher Betrieb einer solchen Modellvorstellung allerdings nur annähern (OLESEN et al. 1999). Überwiegender Konsens ist, dass die Bodenfruchtbarkeit eines Standortes nur mit der Substituierung der entzogenen Makro- und Mikronährstoffe langfristig erhalten werden kann (WATSON et al. 2002b). Vor dem Hintergrund des hohen Energiebedarfes zur Herstellung von industriell synthetisierten bzw. aufbereiteten Mineraldüngern (DAWSON & HILTON 2011), bleibt der Einsatz von Düngemitteln und Bodenhilfsstoffen in mineralischer Form im ökologischen Landbau auf natürlich vorkommende Ressourcen wie z.B. Gesteinsmehle, Kalirohsalze und Rohphosphate begrenzt. Zusätzlich geht die Gewinnung von Nährstoffen wie z.B. Phosphor aus nicht erneuerbaren und damit endlichen Lagerstätten mit teils erheblichen negativen Effekten auf die Umwelt in den Abbaugebieten einher (GAUDRY et al. 2007, CORDELL et al. 2009). Vor diesem Hintergrund kommt der Verwendung von wirtschaftseigenen organischen Düngemitteln (Stroh, Mist, Gülle), Sekundärrohstoffen (Komposte) und organischen Handelsdüngemitteln (z.B. Horn- und Haarmehlprodukte) als Nährstoffquelle im ökologischen Landbau eine große Bedeutung zu. Die Einsicht in eine notwendige Substituierung entzogener Nährstoffe in ausreichender Menge spiegelt sich jedoch nur teilweise in den Nährstoffbilanzen ökologisch bewirtschafteter Flächen wieder. ZORN & WAGNER (2010) stellten in ihrer Untersuchung von 24 ökologisch bewirtschafteten Ackerflächen in Thüringen in einem Zeitraum von fünf Jahren (2004 bis 2009) einen Anstieg des Flächenanteils mit ungenügender P-Versorgung (Versorgungsstufe A) von 8 % auf 23 % fest. Der Flächenanteil mit ungenügender K-Versorgung im Boden stieg im selben Zeitraum von 21 % auf 27 %. SCHMIDTKE et al. (2015) ermittelten in einer Untersuchung der Ackerschläge von 32 ökologisch wirtschaftenden Betrieben in Sachsen ein Bilanzsaldo von -9 kg Phosphor je Hektar und Jahr und -39 kg Kalium je Hektar und Jahr im Mittel für den Zeitraum 2006 bis 2011. Nachgewiesen werden konnte in

dieser Untersuchung ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Höhe des Einsatzes wirtschaftseigener Düngemittel und dem Erreichen eines ausgeglichenen P-Flächenbilanzsaldos. Von Bilanzsalden bis zu -25 kg Phosphor je Hektar und Jahr und -300 kg Kalium je Hektar und Jahr im Zeitraum 1994 bis 1999 auf zwei Standorten in Norwegen in Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil an Feldfutter und Gemüse und ohne ausreichende Düngung berichten ASDAL & BAKKEN (1999). WATSON et al. (2002a) ermittelten hingegen nach Auswertung der Nährstoffbilanzen von 47 ökologisch wirtschaftenden Milchvieh- und Gemischtbetrieben in Großbritannien im Zeitraum 1995 bis 1999 ein positives Saldo von 3 kg Phosphor je Hektar und Jahr und 9 kg Kalium je Hektar und Jahr und führen dies auf die Rückführung der anfallenden Wirtschaftsdünger und den zusätzlichen Einsatz von betriebsfremden organischen Düngemitteln zurück.

Die Bereitstellung von Nährstoffen im Boden - insbesondere die Mineralisierung von organisch gebundenen Nährstoffen wie Stickstoff, Phosphor und Schwefel - kann neben der Düngung auch durch andere Bewirtschaftungsmaßnahmen wie z.B. der Bodenbearbeitung beeinflusst werden (RASMUSSEN 1999, PEKRUN et al. 2003). Eine vergleichsweise intensive und häufige Bodenbearbeitung, welcher auch mit Blick auf die Unkrautregulierung eine außerordentlich große Bedeutung im ökologischen Landbau zukommt (BOND & GRUNDY 2001, HATCHER & MELANDER 2003), kann jedoch ohne Ausgleichsmaßnahmen in Form von organischer Düngung langfristig zu einer Abnahme des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden führen (REICOSKY 1997, PETERSON et al. 1998, SIX et al. 2000). Dies steht dem Anspruch des ökologischen Landbaus, gegenüber der konventionellen Bewirtschaftung sowohl die Bodenaktivität als auch den Humusgehalt im Boden zu erhöhen entgegen (STOLZE et al. 2000). MANNA et al. (2007) wiesen in der Auswertung eines Feldversuches unter subtropischen Bedingungen über einen Zeitraum von 30 Jahren einen Rückgang des C_{org} -Gehaltes im Boden ohne organische Düngung nach. RASMUSSEN et al. (1998) zeigten in der Auswertung mehrerer Langzeitfeldversuche unter semiariden Bedingungen (Zeiträume zwischen 10 und 60 Jahren) eine langfristig erkennbare Abnahme des C_{org} -Gehaltes im Boden bei jeglicher Bodenbearbeitung mit Ausnahme der Direktsaat und der regelmäßigen Zufuhr organischer Feststoffe (Stroh und Mist). Neben den angeführten Beispielen belegen zahlreiche weitere Untersuchungen die positiven Effekte und die dringende Notwendigkeit des Einsatzes von Wirtschaftsdüngemitteln mit Blick auf die Nährstoffnachlieferung und eine

ausgeglichene Humusbilanz (VERONA 1971, KOLENBRANDER 1974, HAYNES & NAIDU 1998, KIRCHMANN et al. 2004, KALLENBACH & GRANDY 2011). Der sich in den letzten Jahrzehnten vollziehende Strukturwandel in der Landwirtschaft mit einem Rückgang der viehhaltenden Betriebe bei gleichzeitigem Anstieg der Anzahl an Tieren je Betrieb, hatte die Entstehung reiner Marktfruchtbetriebe mit einem hohen Grad der Spezialisierung in Deutschland (SÄDBL 2011, BMELV 2012) und europaweit (HØGH-JENSEN 1999) zur Folge. Damit ergibt sich für Betriebe mit einer geringen Anzahl an Tieren bzw. viehlos wirtschaftende Betriebe des ökologischen Landbaus die Frage nach alternativen organischen Düngemitteln, was u.a. dazu führt, dass neben Bioabfall- und Grüngutkomposten auch Abfälle aus fleisch- und obstverarbeitenden Bereichen bis hin zu Reststoffen der Futtermittelindustrie als Düngemittel genutzt werden (DE HAAN 1981, GUTSER 1996, MÖLLER & SCHULTHEISS 2014) und selbst Siedlungsabfallkomposte und Klärschlämme nach entsprechender Aufbereitung zukünftig auch für den ökologischen Landbau wichtige Quellen der Nährstofflieferung sein können (WEIGAND & BERTAU 2014).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vier organische Düngemittel - Stroh, Grüngutkompost, frischer Pferdemist und Gehölzhäcksel - hinsichtlich ihrer kurzfristigen pflanzenbaulichen Effekte nach ihrer Einarbeitung in den Boden geprüft. Hintergrund der Auswahl war vor allem die bestehende Diskrepanz zwischen den hohen Nährstoffgehalten in den genannten Düngemitteln und dem geringen Umfang ihres Einsatzes, insbesondere von Gehölzhäckseln und Pferdemist in der landwirtschaftlichen Praxis, welche nicht ausschließlich mit der begrenzten Verfügbarkeit der Materialien zu begründen ist (KERN et al. 2003, BRADE et al. 2011, KEHRES 2011, SADAU 2012). Nachgewiesene negative Effekte einiger zur Düngung verwendeter organischer Materialien, wie etwa eine Keim- und Wuchshemmung der gedüngten Kulturpflanzen (HILDEBRAND 1979, RÜDIGER & LOHAUS 1987, EVERALL & LEES 1997, LAL 1989, PÖTZSCH 2010, Lux & Schmidtke 2013, LUX et al. 2013), eine N-Festlegung im Boden aufgrund eines weiten C/N-Verhältnis im Düngemittel oder aufgrund sehr hoher Aufwandmengen (SHIVASHANKAR & VLASSAK 1978, GÖK & OTTOW 1988, OCIO & JENKINSON 1991, TIMMERMANN & KLUGE 1996, BRANDT & WILDHAGEN 1999) und einer sehr langsamen und witterungsabhängigen Freisetzung organisch gebundener Nährstoffe wie z.B. Stickstoff, Phosphor und Schwefel (KEELING et al. 1995, KLASNIK & STEFFENS 1996, STEFFENS 1996, GUTSER 1996, TAUBNER et al. 2009)

fördern immer wieder eine kritische Diskussion um den Einsatz dieser Stoffe in der Breite der landwirtschaftlichen Praxis.

Ein Anliegen der Arbeit war es deshalb, Strategien für eine sinnvolle Integration der genannten organischen Düngemittel in ein ackerbauliches System zu erarbeiten. Vor allem um einer möglichen N-Immobilisierung im Boden nach Applikation dieser Düngemittel zu begegnen, wurden die ausgewählten Düngemittel zu Leguminosen eingesetzt. Um eine zeitlich und artabhängige Reaktion der Pflanzen auf die einzelnen Düngemittel darzustellen, wurden diese jeweils zu Saatplatterbse im Zwischenfruchtbau sowie Ackerbohne und Rotklee im Hauptfruchtbau eingesetzt. Einerseits kommt dem Anbau von Leguminosen im ökologischen Landbau hinsichtlich ihres Beitrages zu einer nachhaltigen N-Versorgung (BOHLOOL et al. 1992, OBERSON et al. 2007), zur Erhaltung des Humusgehaltes im Boden (DRINKWATER et al. 1998) und ihrer aufgrund ihrer guten Vorfruchtwirkung (KÖPKE 1996) eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund ihrer Fähigkeit zur symbiotischen N_2 -Fixierung und der damit verbundenen Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit an mineralischem Stickstoff im Boden sind sie andererseits gut geeignet, eine räumlich und zeitlich begrenzte N-Immobilisierung im Boden ohne Ertragseinbußen überbrücken zu können. Während hohe Mengen an mineralischem Stickstoff im Boden im Allgemeinen zu einer verringerten Nodulation der Wurzeln und in der Folge zu einer geringeren symbiotischen N_2 -Fixierung von Leguminosen führen, könnte hingegen ein durch N-Immobilisierung im Boden verursachter N-Mangel infolge einer organischen Düngung eine gesteigerte symbiotische N_2 -Fixierung bewirken (RICHARDS & SOPER 1979, HANSEN et al. 1989, HARDARSON et al. 1991, PEOPLES et al. 1995, HARDARSON & ATKINS 2003). Mit dem Einsatz organischer Stoffe als Düngemittel sind teilweise sehr komplexe Wirkungen auf chemische und physikalische Eigenschaften des Bodens verbunden. Neben der Nährstoffzufuhr als eigentliche (direkte) Düngewirkung kann eine regelmäßige organische Düngung (indirekt) z.B. den Gehalt an organischer und mikrobieller Substanz und die biologische Aktivität im Boden (z.B. Urease- und Phosphataseaktivität) beeinflussen (KANDELER et al. 1999, LI et al. 2007). Um Änderungen von Bodeneigenschaften in Folge von Düngerapplikation, wie z.B. Humusgehalt, Gefügestabilität, Wasser- und Nährstoffspeichervermögen ackerbaulicher Systeme an einem Standort sinnvoll abzubilden, werden zumeist Dauerfeldversuche mit einer Versuchsdauer von mehr als 8 bis 10 Jahren betrachtet (ASMUS 1995, ELLMER et al. 2000, MÄDER et al. 2000,

ALBERT 2001, EDMEADES 2003, MARSCHNER et al. 2003, TURLEY et al. 2003, KIRCHMANN et al. 2004, ZALLER & KÖPKE 2004, NETT et al. 2010, CHALHOUB et al. 2013). Sinnvoll können jedoch auch Untersuchungen zu kurzfristigen Wirkungen einer organischen Düngung in Kenntnis der vorangegangenen Bewirtschaftungs- und Düngemaßnahmen der untersuchten Fläche oder bei Änderungen der Düngerart und -menge einer Variante in einem über längere Zeit bestehenden Feldversuch sein (CHANTIGNY et al. 2001, GUTSER et al. 2005). Kurzfristige Effekte sind besonders bei einem geringen Niveau der Nährstoffverfügbarkeit oder gar einem Nährstoffmangel nach einseitiger oder unterlassener Düngung über einen längeren Zeitraum zu erwarten (HOFFLAND et al. 1989, HOFFLAND 1992). Im Feldversuch `Ewiger Roggenbau` in Halle an der Saale konnten z.B. nach mehr als 50 Jahren ausschließlich mineralischer N-Düngung bereits im ersten Jahr nach zusätzlicher Applikation von Stallmist deutlich höhere Kornerträge gegenüber der bis dahin bestehenden Düngung erzielt werden (GARZ et al. 1996). RÖMER & LEHNE (2004) konnten im Rahmen eines Gefäßversuches durch die Düngung von Bioabfallkompost in einem langjährig ökologisch bewirtschafteten Boden, der einen geringen Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor aufwies, den Sprossertrag sowie N- und P-Entzug von Rotklee signifikant erhöhen.

In den hier vorgenommenen Untersuchungen standen insbesondere kurzfristige Effekte der organischen Düngung auf die untersuchten Leguminosen und einen nachfolgenden Winterweizen auf einem Standort im Mittelpunkt des Interesses.

Folgende Fragen bzw. Hypothesen sollten mit den durchgeführten Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

- Neben schnell verfügbaren (Kalium) werden auch organisch gebundene Makronährstoffe (Phosphor, Schwefel) und Mikronährstoffe (Molybdän) in den organischen Düngemitteln kurzfristig in erkennbarem Umfang pflanzenverfügbar und führen zu einer verbesserten Nährstoffversorgung der Leguminosen.
- Die Ausbringung hoher N-Mengen mit den eingesetzten organischen Düngemitteln führt nicht zu einer signifikanten Abnahme der absoluten Menge an symbiotisch fixiertem Stickstoff der geprüften Leguminosen. Jedoch kann die N-Versorgung des nachfolgenden Winterweizens durch einen längeren Zeitraum der biologischen Umsetzung und damit verbundenen N-Mineralisation des applizierten

organischen Materials verbessert werden und somit die Vorfruchtwirkung der Leguminosen gesteigert werden.

Der Umsatz organischer Düngemittel unter optimalen Bedingungen im Boden (Sauerstoffverfügbarkeit, Temperatur und Wassergehalt) und die Zufuhr einer ausreichend hohen Menge an niedermolekularen organischen Kohlenstoffverbindungen mit der Einbringung von organischem Material haben einen raschen Anstieg der Bodenatmung aufgrund der eintretenden biologischen Umsetzungsprozesse zur Folge (PAUL & BEAUCAMP 1989, ROCHETTE & GREGORICH 1998, DING et al. 2007, TRIBERTI et al. 2008). Bei Materialien mit einem weiten C/N-Verhältnis (Stroh, Gehölzhäcksel) kann es in der folgenden Zeit im Bereich des eingearbeiteten Materials zu einem Mangel an mineralischem Stickstoff kommen, welchen die am Umbauprozess beteiligten Mikroorganismen zum Aufbau von körpereigenem Eiweiß benötigen (KNAPP et al. 1983, NIEDER & RICHTER 1986, CHRISTENSEN 1987). Beide zu erwartenden Effekte sollten dahingehend genutzt werden, den N_{\min} -Vorrat im Boden temporär zu verknappen und die Leguminosen verstärkt zu einer symbiotischen N_2 -Fixierung anzuregen. Die verwendeten organischen Düngemittel wurden daher in einer vergleichsweise hohen Menge mit einem C-Äquivalent von $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$ (Stroh $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$) unmittelbar vor der Saat der Leguminosen ausgebracht und flach in den Boden eingearbeitet.

Folgende Hypothesen sollten geprüft werden:

- Durch den Eintrag hoher Mengen an Kohlenstoff in den Boden infolge der Applikation der organischen Düngemittel, verbunden mit einem weiten C/N-Verhältnis im Stroh und im Gehölzhäcksel, wird eine temporäre N-Immobilisierung im Oberboden induziert. Infolge dessen kommt es zu einer erhöhten symbiotischen N_2 -Fixierung der untersuchten Leguminosen.
- Die Einarbeitung der applizierten organischen Düngemittel führt zu einer erhöhten Entbindung von CO_2 aus dem Boden, welches von den Pflanzen zur Assimilation im Rahmen der Photosynthese genutzt werden kann (CO_2 -Dünge-Effekt). Ziel ist die Quantifizierung der aufgenommenen Menge an düngebürtigem Kohlenstoff.

Für die Ermittlung der tatsächlich aufgenommenen Menge an düngebürtigem Kohlenstoff erfolgte eine gesonderte Versuchsanstellung mit der Ausbringung von Weizenstroh zu Rotklee im Gewächshaus und im Freiland, welches mit ^{13}C -Isotopen

markiert wurde. Genutzt wurde eine Methode, mit welcher mittels Tracer der aus dem Boden freigesetzte und über die Photosynthese assimilierte Kohlenstoff in Form von CO_2 aus dem gedüngten Stroh im Rotklee nachgewiesen werden sollte. Die Nutzung von Kohlenstoffisotopen in natürlicher oder angereicherter Form (^{13}C und ^{14}C) als Tracer ist eine verbreitete Technik zur Ermittlung von Stoffumsätzen im Boden (BALESDENT et al. 1987, VAN VUUREN et al. 2000, KRULL et al. 2002, MOORE-KUCERA & DICK 2008), der Stoffaufnahme aus dem Boden und der Atmosphäre in die Pflanze (FÜHR & SAUERBECK 1967a, FÜHR & SAUERBECK 1967b, LLOYD & FARQUHAR 1994) sowie zur Verfolgung von Stoffströmen innerhalb der Pflanze (SCHMIDT & GLEIXNER 1998, GÖTZ et al. 2007). In der angewandten Form wird diese Methodik von anderen Autoren nur in ähnlicher Weise beschrieben (CHENG & COLEMAN 1990).

2 Versuchsanstellung und Methodik

Die der Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungen gliedern sich in zwei Versuchsabschnitte. In den Jahren 2008 bis 2011 wurden auf den Versuchsflächen der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden-Pillnitz die Düngeversuche zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee, jeweils mit nachfolgendem Winterweizen durchgeführt. Im Zeitraum 2011 bis 2012 erfolgten die Untersuchungen mit Strohdüngung zu Rotklee in einer Kombination von Parzellen- und Gefäßversuchen im Freiland und zusätzlich im Jahr 2011 als Gefäßversuch im Gewächshaus.

2.1 Versuchsstandort

Die Untersuchungen im Feld in den Jahren 2008 bis 2012 wurden auf den Versuchsflächen der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden-Pillnitz durchgeführt. Die Flächen befinden sich am südöstlichen Rand der Stadt Dresden auf einer Höhe von 117,5 m über NN in der Elbaue auf einer nördlichen Breite von 51°00'04,82" und einer östlichen Länge von 13°53'23,66". Der Bodentyp des Versuchsstandortes ist eine Braunerde aus Auenlehm. Die Bodenart ist lehmiger Sand mit Abstufungen der Korngrößenfraktionen in den einzelnen Horizonten (Tab. 1).

Tab. 1: Korngrößenverteilung des Feinbodens und bodenphysikalische Kennwerte der Versuchsfläche am Versuchsstandort Dresden-Pillnitz

Horizont	Textur (Masse- % der kalk und humusfreien Feinerde) ²						
	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T
Ap	2,3	23,7	21,5	15,3	12,0	6,8	10,3
Bv	1,3	25,7	25,0	7,4	15,6	5,7	12,9
Sg	4,3	34,8	34,2	7,1	4,4	3,1	7,0
Horizont	Bodenart	Tiefe	Luftkapazität	FK	nFK	nFKWe	
		cm	Vol.-%			mm	
Ap	SI3	0-35	13,4	29,2	21,1	76	
Bv	SI4	35-60	15,6	24,6	16,5	40	
Sg	SI2	> 60	9,9	28,1	15,5	62 ¹	

¹ bei einem effektiven Wurzelraum von 100 cm, ² Summe < 100 % methodisch bedingt

Kennzeichnend sind ein mittlerer Tongehalt von 10 % und ein steigender Sandanteil von 47,5 % auf 73,3 % mit zunehmender Tiefe im Profil. Am Standort besteht teilweise Haft- und Stauwassereinfluss. Die Trockenrohdichte beträgt im Ap-Horizont $1,49 \text{ g cm}^{-3}$, im Bv-Horizont $1,56 \text{ g cm}^{-3}$ und im Sg-Horizont $1,61 \text{ g cm}^{-3}$. Die Kenngrößen zur Charakterisierung des Bodens wurden mit Hilfe eines Profilanschnittes auf der Versuchsfläche im Jahr 2010 ermittelt. Die Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung wurde nach DIN 19 683 Bl. 2 durchgeführt. Methodisch kommt es bei der Bestimmung der einzelnen Korngrößenfraktionen zu Verlusten bei den Teilverfahren Siebung und Sedimentation. Dies kann dazu führen, dass die Summe der Korngrößenfraktionen kleiner 100 % ist. Die Erfassung der Trockenrohdichte erfolgte nach DIN ISO 11272:2001-1 (Stechzylindermethode), die Ermittlung der Luftkapazität des Bodens nach DIN ISO 11272:1998. In Tab. 2 sind der pH-Wert, die Mengen an pflanzenverfügbarem Phosphor, Kalium und Magnesium und die Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff in einer Tiefe von 0 bis 30 cm im Boden des Versuchsstandortes angegeben.

Tab. 2: Chemische Kennwerte* des Bodens in einer Tiefe von 0 bis 30 cm am Versuchsstandort Dresden-Pillnitz im Zeitraum 2008 bis 2012

Zeitpunkt der Probenahme	pH ¹	C _t	N _t	P ²	K ²	Mg ¹
		%	%	[mg 100g ⁻¹]	[mg 100g ⁻¹]	[mg 100g ⁻¹]
Juli 2008	6,2	n.b.	n.b.	5,8	16,7	9,8
März 2009	5,5	1,00	0,10	6,3	13,7	9,3
Juli 2009	5,7	0,99	0,11	5,8	13,6	10,2
März 2010	6,0	0,89	0,12	6,8	14,5	11,3
März 2011	6,0	1,11	0,12	5,8	12,7	10,4
März 2012	n.b.	1,45	0,13	4,7	15,4	11,2

¹ Bestimmung in 0,01 M Calciumchloridlösung (CaCl₂)

² Bestimmung im CAL-Auszug

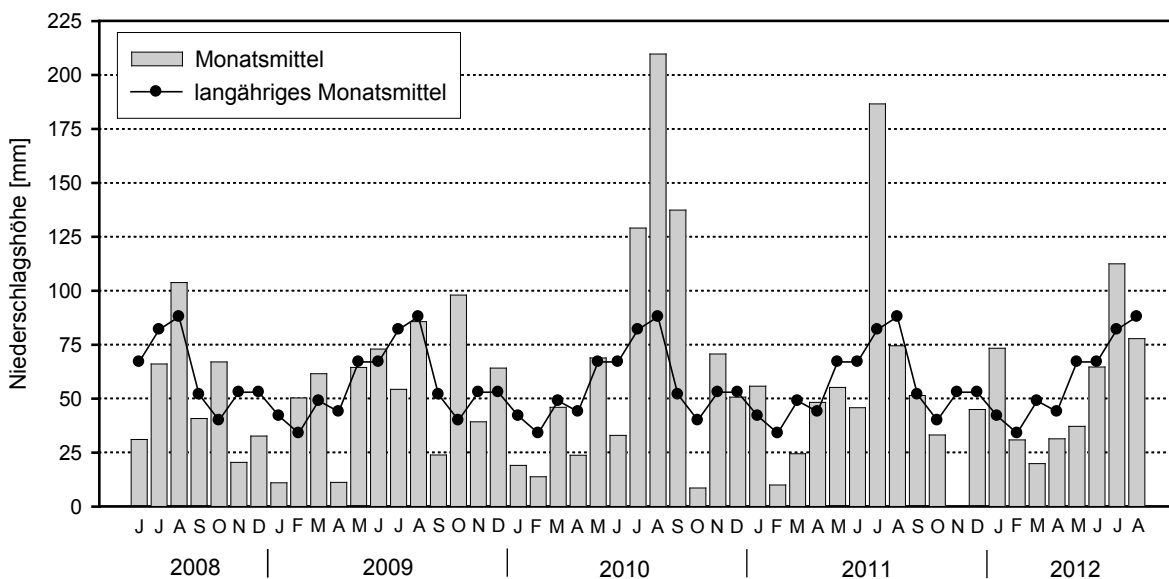
*Angaben zur Analysenmethodik in Kapitel 2.5.7

Die Entnahme der Proben zur Nährstoffanalyse des Bodens erfolgte jeweils vor der Anlage der einzelnen Feldversuche auf der entsprechenden Teilfläche. Mit Ausnahme des Wertes der Probenahme im März 2012 kann anhand der ermittelten Mengen an pflanzenverfügbarem P zwischen 5,8 und 6,8 mg je 100 g Boden von einer guten P-Versorgung des Bodens ausgegangen werden. Bei Kaliumgehalten

zwischen 12,7 und 16,7 mg je 100 g Boden lag die Versorgung der Versuchsfläche in Versorgungsstufe D (LFL 2008). Die Gehalte an Magnesium sind mit Werten zwischen 9,3 und 11,3 mg je 100 g Boden für die angegebene Bodenart als vergleichsweise hoch einzustufen. Die Ackerfläche wird seit dem Jahr 2003 nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus bewirtschaftet.

2.2 Witterung im Versuchszeitraum

Die Werte zum Niederschlags- und Temperaturverlauf im Versuchszeitraum wurden von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft bereitgestellt, welche vor Ort eine Wetterstation betreibt. In Abb. 1 sind die mittleren monatlichen Niederschlagshöhen im Versuchszeitraum den langjährigen Mitteln (1981 bis 2010) gegenübergestellt.



In Abb. 2 sind die mittleren Lufttemperaturen in einer Höhe von zwei Metern über dem Boden im Versuchszeitraum den langjährigen Mitteln am Versuchsstandort gegenübergestellt.

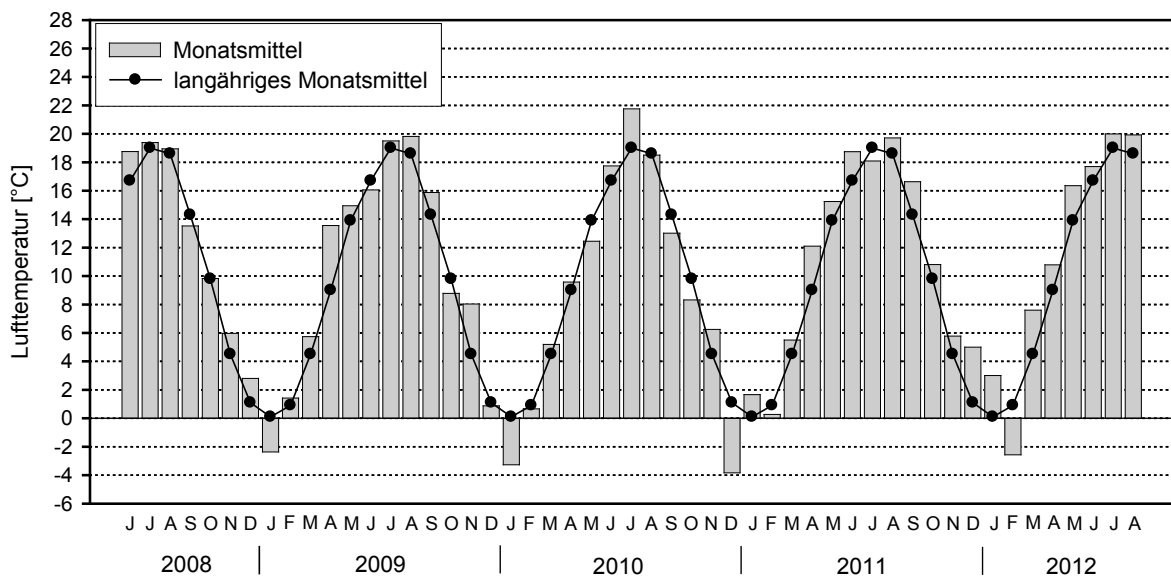


Abb. 2: Temperaturverlauf (Monatsmittel) im Versuchszeitraum und langjähriges Mittel (1981 bis 2010) am Standort Dresden-Pillnitz

In einigen Monaten zeigten sich im Versuchszeitraum teils deutliche Abweichungen der Monatsmitteltemperatur gegenüber dem langjährigen Mittel. Die Jahresmitteltemperatur im Zeitraum Januar 2008 bis Dezember 2012 lag insgesamt mit 10,2 °C deutlich über dem Wert des langjährigen Mittels, welches 9,4 °C im Zeitraum 1981 bis 2010 betrug (Tab. 3).

Tab. 3: Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagsmenge im langjährigen Mittel und im Versuchszeitraum 2008 bis 2010 (Wetterstation der Landesanstalt für Landwirtschaft am Standort Dresden-Pillnitz)

Zeitraum	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm)
1981 bis 2010	9,4 °C	671 mm
2008 bis 2012	10,2 °C	652 mm

Die Werte für Lufttemperatur und -feuchtigkeit im Versuchszeitraum des Gefäßversuches mit Rotklee im Gewächshaus wurden mit Hilfe eines Datenloggers (Tinytag Ultra, Firma Gemini Data Loggers, UK) ermittelt (Abb. 3).

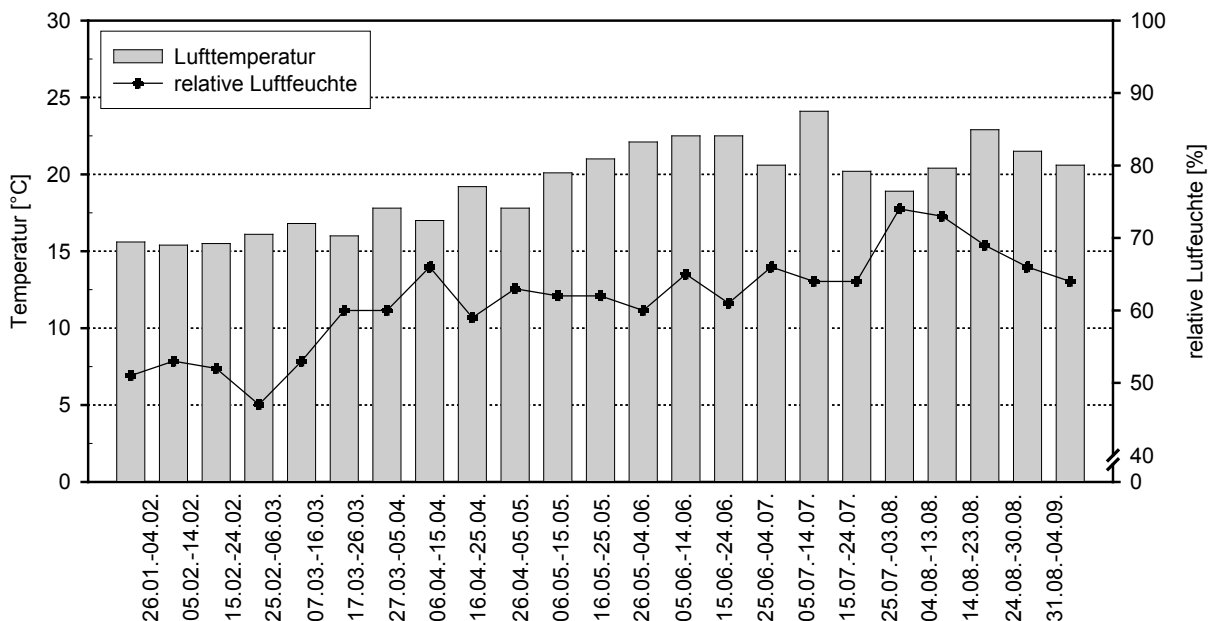


Abb. 3: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte (arithmetisches Mittel der Stundenwerte von 10 Tagen) im Gewächshaus während der Durchführung des Gefäßversuches mit Rotklee im Zeitraum vom 26.01. bis 04.09.2011

Die stündlich aufgezeichneten Temperaturen wurden jeweils für einen Zeitraum von zehn Tagen gemittelt und lagen im Bereich zwischen 15,5 und 17,8 °C in der Zeit von der Aussaat bis zum ersten Schnitt und im Bereich zwischen 17,8 und 24,1 °C im Zeitraum bis zum letzten Schnitt des Rotklee. Die relative Luftfeuchtigkeit lag im Versuchszeitraum im Mittel bei 62 % im Bereich zwischen 47 und 66 %.

2.3 Versuchsanlagen und Versuchsdurchführung

Im Folgenden werden die Anlage und die ausgeführten Arbeitsschritte für die beiden Versuchsabschnitte a) organische Düngung zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee im Zeitraum 2008 bis 2011 und b) Strohdüngung zu Rotklee im Zeitraum 2011 und 2012 gesondert beschrieben.

2.3.1 Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee 2008 bis 2011

Die verwendeten Arten und Sorten sowie die Saatstärke der untersuchten Kulturen in den Feld- und Gefäßversuchen sind in Tab. 4 angegeben. Die Untersuchungen zur Düngung der Saatplatterbse (*Lathyrus sativus* L., Sorte `Merkus`) erfolgten in Form einer einfaktoriellen Blockanlage mit sechs Prüfgliedern der Düngung und vier

Wiederholungen im Jahr 2008 und wurden in identischer Form im Jahr 2009 wiederholt.

Tab. 4: Arten, Sortenbezeichnung und Saatkichte der verwendeten Kulturen am Standort Dresden-Pillnitz in den Jahren 2008 bis 2012

Kulturart	Botanischer Name	Sorte	Saatkichte [kf. Samen m ⁻²]
Saatplatterbse	<i>Lathyrus sativus</i> L.	Merkus	100
Ackerbohne	<i>Vicia faba</i> L.	Fuego	50
Rotklee	<i>Trifolium pratense</i> L.	Titus	850
Welsches Weidelgras	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	Lipo	1500
Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i> L.	Libor	800
Winterweichweizen	<i>Triticum aestivum</i> L.	Achat	300

Die Untersuchungen zur Düngung der Ackerbohne (*Vicia faba* L., Sorte `Fuego`) und des Rotklees (*Trifolium pratense* L., Sorte `Titus`) wurden in Form einer zweifaktoriellen Spaltanlage mit der Obereinheit Düngung und der Untereinheit Kulturart im Jahr 2009 angelegt und in identischer Form im Jahr 2010 wiederholt. Die entsprechend genutzten Versuchsanlagen sind in Abb. A 1 und Abb. A 2 im Anhang dargestellt. Zu allen Leguminosen wurden jeweils Parzellen mit Referenzkulturen zur Schätzung der symbiotischen N₂-Fixierleistung angelegt. Als Referenzkultur zu Saatplatterbse und Rotklee wurde Welsches Weidelgras (*Lolium multiflorum* Lam.) der Sorte `Lipo` verwendet. Als Referenzkultur zu Ackerbohne wurde *Plantago lanceolata* L. (Spitzwegerich) der Sorte `Libor` eingesetzt. Zur Untersuchung der Vorfruchteffekte der Leguminosen wurde nach allen Kulturen ein Winterweichweizen (*Triticum aestivum* L.) der Sorte `Achat` etabliert, welcher im jeweils auf die Leguminose folgenden Jahr geerntet wurde. Die Parzellengröße bei Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras betrug jeweils 9,5 m² (7,0 m × 1,35 m). Die Parzellengröße bei Rotklee und Ackerbohne betrug 13,5 m² (1,35 m × 10 m). Die Größe der Parzellen der Referenzkulturen zu Ackerbohne und Rotklee betrug in allen Versuchen 6,75 m² (1,35 m × 5 m). Die durchgeführten Maßnahmen und die zeitliche Abfolge aller Untersuchungen im Feld sind in Tab. A 1 im Anhang aufgeführt. Im Juli der Jahre 2008 und 2009 wurde jeweils nach der Ernte der Vorfrucht Sommergerste eine tief wendende Bodenbearbeitung mit einem Pflug (Lemken-Vari Opal 5,

Bearbeitungstiefe ~ 25 cm) und eine darauf folgende Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge (Firma Maschio) durchgeführt. Anschließend wurden die Düngemittel parzellengenau (Großparzelle) eingewogen und von Hand ausgebracht. Die Einarbeitung der ausgebrachten Düngemittel erfolgte mit der Kreiselegge bei einer Bearbeitungstiefe von etwa 10 cm. Die Saatplatterbse und die Referenzkultur wurden danach mit einer Parzellensämaschine (Typ Hege 80) mit RoTeC-Rollscharen (Firma Amazone) in einem Reihenabstand von 15 cm gesät. Während der Vegetationszeit wurde keine Unkrautregulierung durchgeführt. Die Sprossmasse der Saatplatterbse und der Referenzfrucht wurde am 20.10.2008 bzw. am 21.10.2009 von Hand geerntet, wobei die Sprosse direkt oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten wurden. Angaben zur Größe der beernteten Fläche der untersuchten Kulturen sind in Kapitel 2.5.1 ersichtlich. Neben einer Kleinparzelle mit der Referenzkultur Welsches Weidelgras und einer Kleinparzelle mit Saatplatterbse für Messungen und eine Handbeerntung wurde in jeder Großparzelle eine zusätzliche Kleinparzelle mit Saatplatterbse angelegt, welche ausschließlich für die Aussaat des nachfolgenden Weizens vorgesehen war (Abb. A 1 im Anhang). Nach der Ernte der Saatplatterbse wurden die verbliebenden Pflanzen auf den für die Nachfrucht vorgesehenen Parzellen gemulcht und es erfolgte eine nicht wendende Bodenbearbeitung mit einem Flügelschargrubber (Firma Lemken) auf einer Tiefe von etwa 15 cm und eine anschließende Saatbettbereitung mit der Kreiselegge. Die Aussaat des Winterweizens wurde am 05.11.2008 bzw. am 31.10.2009 mit der Parzellensämaschine durchgeführt. Der Winterweizen wurde nicht gedüngt.

Die Bodenbearbeitung und Düngung zu Ackerbohne und Rotklee sowie die Aussaat erfolgte nach Vorfrucht Kartoffel jeweils im Frühjahr am 03.03.2009 und am 11.03.2010 analog zur Verfahrensweise bei der Zwischenfrucht Saatplatterbse. Auch in Ackerbohne und Rotklee wurde keine Unkrautregulierung durchgeführt. Die Ernte der Ackerbohne und der Referenzfrucht Spitzwegerich erfolgte von Hand am 31.08.2009 und am 09.08.2010. Der Kornertrag der Ackerbohne wurde zusätzlich auf der gesamten Parzelle am 08.09.2009 bzw. am 22.08.2010 mit einem Parzellensämaschine (Firma Wintersteiger, Typ `Classik`) erfasst.

Der Rotklee und die Referenzfrucht Welsches Weidelgras wurden in beiden Versuchsjahren zu jeweils drei Terminen geerntet. Es verblieb nach der Handernte jeweils kein Schnittgut auf der Fläche des Rotklees und der Referenzfrucht. Der Schnitt des Rotklees erfolgte in einer Höhe von etwa 5 cm über dem Boden, um den

Wiederaustrieb der Pflanzen zu gewährleisten. Zum letzten Schnitttermin wurden in beiden Versuchsjahren die Stoppeln des Rotklees bodennah geerntet. Angaben zu den Größen der beernteten Flächen finden sich in Abschnitt 2.5.1. Nach dem letzten Schnitt des Rotklees wurden alle Parzellen der Leguminosen und der Referenzkulturen gemulcht, um alle verbliebenen Pflanzenreste auf der Versuchsfäche zu zerkleinern. Im Anschluss erfolgten wie bei der Saatplatterbse, eine nicht wendende Bodenbearbeitung mit dem Flügelschargrubber auf einer Tiefe von etwa 15 cm, eine Saatbettbereitung mit der Kreiselegge und die Aussaat des Winterweizens (31.10.2009 und 11.10.2010) mit der Parzellensämaschine.

Zur Minderung von Windeinflüssen (Luftverwirbelung) in den Pflanzenbeständen wurde in allen beschriebenen Versuchsanlagen nach erfolgter Saat der Leguminosen eine UV-beständige Gitterfolie in einer Höhe von 0,7 m um jede Großparzelle installiert (siehe auch Abb. A 5 und Abb. A 7). Der Windschutz verblieb während der gesamten Vegetationszeit der Leguminosen und wurde jeweils nach der letzten Handerte im Herbst entfernt.

Die Ernte des Winterweizens erfolgte nach Vorfrucht Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee zum Zeitpunkt der Abreife des Korns jeweils in Form einer Handerte und eines anschließenden Parzellendrusches auf der verbleibenden Fläche der Parzellen zur Erfassung des Kornertrages (Erntetermine in Tab. A 1 ersichtlich).

2.3.2 Gefäßversuch im Gewächshaus zu Rotklee 2011

Im Jahr 2011 erfolgte im Gewächshaus der HTW-Dresden eine Strohdüngung zu Rotklee im Rahmen eines Gefäßversuches in den Varianten a) Düngung von Stroh mit ^{15}N - und ^{13}C -Markierung, b) Düngung von Stroh ohne ^{15}N - und ^{13}C -Markierung sowie c) einer Kontrollvariante ohne Strohdüngung.

Am 26.01.2011 wurden Pflanzgefäße mit einer Gefäßoberfläche von 256 cm² und einem Volumen von 3380 cm³ mit Boden von der Versuchsfäche der HTW-Dresden gefüllt, Rotklee der Sorte `Titus` mit einer Saatedichte von 850 keimfähigen Samen je m² ausgesät und in Form einer Blockanlage auf Gewächshaustischen angeordnet. Vor der Saat des Rotklees wurde in den Varianten mit Strohdüngung je Gefäß 29,0 g Stroh (Frischmasse) in einer Tiefe von 4 cm von Hand eingebracht und mit dem Boden vermischt. Die Gefäße wurden mit transparenter PE-Folie (Materialstärke 0,05 mm) bis zu einer Höhe von 40 cm eingehaust, um Luftverwirbelungen über den Gefäßen im Vegetationszeitraum des Rotklees zu

minimieren. Am 21.02.2011 wurde jedem Gefäß eine Menge von 120 mg N, 40 mg P, 200 mg K und 16 mg Mg 0,8 g gelöst in 70 ml Wasser zugegeben (Düngemittel: Ferty 2, Firma Planta GmbH). Der Rotklee wurde zu sechs Terminen geschnitten. Der letzte Schnitt erfolgte am 04.09.2011. Die Gefäße befanden sich während der Vegetationszeit von insgesamt 222 Tagen in mit Wasser gefüllten Schalen (Eintauchtiefe der Gefäße ~ 3 cm). Alle durchgeführten Maßnahmen während der Vegetationszeit des Rotklees sind in Tab. A 2 aufgeführt.

2.3.3 Gefäßversuch im Freiland zu Rotklee 2011 und 2012

In den Jahren 2011 und 2012 wurde auf der Versuchsfläche der HTW Dresden jeweils ein einfaktorieller Feldversuch mit Strohdüngung zu Rotklee mit vier Wiederholungen angelegt. Die Versuchsanlage mit Anordnung der Gefäße in den Parzellen ist in Abb. A 3 im Anhang dargestellt. Der Versuchsaufbau gliederte sich in zwei Teile:

a) Anlage eines Feldversuches mit Parzellen (9,5 m²) ohne und mit Strohdüngung.

Nach erfolgter Ernte der Vorfrucht Sommergerste und der Beräumung des Strohs der Gerste wurde am 19.04.2011 bzw. 27.03.2012 jeweils eine tief wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug in einer Bearbeitungstiefe von ~ 25 cm und eine darauf folgende Bodenbearbeitung mit der Kreiselegge (Bearbeitungstiefe ~ 10 cm) durchgeführt. Anschließend wurde am 20.04.2011 bzw. am 28.03.2012 das auf eine Partikelgröße von ≤ 5 mm vermahlene Weizenstroh in einer Menge von umgerechnet 4,88 t ha⁻¹ (entspricht einer gedüngten Menge an Kohlenstoff von 2,15 t ha⁻¹) von Hand ausgebracht. Die Einarbeitung des Strohs erfolgte von Hand mit Hilfe einer Harke in einer Tiefe von etwa 5 cm. Gesät wurde der Rotklee (Sorte 'Titus') mit einer Saatchichte von 850 keimfähigen Samen je m² mit der Parzellensämaschine unmittelbar nach der Einarbeitung des Strohs. Neben den mit Stroh gedüngten Parzellen wurde in jeder Wiederholung eine Kontrolle ohne Düngung angelegt. Zur Ermittlung der Bodenatmung wurden je Parzelle zehn Messpunkte festgelegt, an denen zu acht Terminen im Jahr 2011 und zu 15 Terminen im Jahr 2012 Messungen der Bodenatmung durchgeführt wurden (siehe Kapitel 2.8). Der Rotklee wurde in beiden Versuchsjahren jeweils zu den Schnittterminen des Rotklees in den Gefäßen auf der gesamten Parzellenfläche mit Hilfe eines Rasenmähers geerntet (Schnitthöhe ca. 5 cm) und von der Fläche entfernt.

b) Integration eines Gefäßversuches in den beschriebenen Feldversuch mit einer Kontrolle ohne Düngung, Düngung von Stroh ohne ^{13}C -Markierung und Düngung von Stroh mit ^{13}C -Markierung.

Nach der Saat des Rotklees wurden Pflanzgefäße mit einer Gefäßoberfläche von 256 cm^2 und einem Volumen von 3380 cm^3 ebenerdig in den Boden eingelassen und mit Boden gefüllt. Vor der Saat des Rotklees in den Gefäßen wurde das auf eine Partikelgröße von $\leq 5\text{ mm}$ vermahlene Weizenstroh in einer Menge von $12,5\text{ g FM je Gefäß}$ (entspricht einer Menge von $2,148\text{ t ha}^{-1}\text{C}$ -Äquivalent) in einer Tiefe von 4 cm in die Gefäße eingebracht und mit dem Boden vermengt. In der Kontrolle erfolgte keine Düngung von Stroh. Die Saatedichte des Rotklees in den Gefäßen lag wie in den Feldparzellen bei $850\text{ keimfähigen Samen je m}^2$. Am 28.04.2011 bzw. am 03.04.2012 wurden die Gefäße mit transparenter PE-Folie (Materialstärke $0,5\text{ mm}$) bis zu einer Höhe von 40 cm eingehaust, um Luftverwirbelungen über den Gefäßen im Verlauf der Vegetation zu minimieren. Am 24.05.2011 bzw. am 30.04.2012 erfolgte eine NPK-Düngung mit $0,8\text{ g Düngemittel je Gefäß}$ in 70 ml Wasser gelöst (Düngemittel und Aufwandmenge identisch mit Gefäßversuch im Gewächshaus). Der Rotklee in den Parzellen sowie in den Gefäßen wurde in beiden Versuchsjahren zu jeweils vier Terminen geerntet (vergl. auch Tab. A 2).

2.4 Eingesetzte Düngemittel

Die in den Jahren 2008 bis 2010 zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee eingesetzten zwei mineralischen und vier organischen Düngemittel werden im folgenden Kapitel näher beschrieben. Auf das ausschließlich zu Rotklee in den Jahren 2011 und 2012 eingesetzte Stroh wird jeweils gesondert für den Gefäßversuch im Gewächshaus und für die Versuchsanstellung im Freiland, vor allem hinsichtlich der Markierung des Strohs mit ^{15}N - und ^{13}C -Isotopen, eingegangen.

2.4.1 Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee 2008 bis 2010

Der eingesetzte Grüngutkompost war gekennzeichnet durch eine Partikelgröße von kleiner als 10 mm und einer Lagerungsdauer von vier bis sechs Monaten. Im Mittel der vier eingesetzten Komposte betrug deren TS-Gehalt 61% , der Anteil an Kohlenstoff in der Trockenmasse 21% und das C/N-Verhältnis 18 (Tab. 5).

Tab. 5: Eingesetzte Düngemittel zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2008 bis 2010

Bezeichnung ¹	Material	Eigenschaften ²	Herkunft
Kalk	Calciumcarbonat	> 95 % CaCO ₃	Jurakorn Euflor GmbH, München
Mineral	Dolophos 15	15 % P ₂ O ₅ , 15 % MgCO ₃ , 65 % CaCO ₃	DüKa GmbH, Barbing
	Kaliumsulfat	50 % K ₂ O 18 % S (wasserlöslich)	
Kompost	Grüngutkompost	gesiebt < 10 mm, Lagerungsdauer: > vier Monate, im Mittel (n = 4): 61 % TM, 21 % C i.d. TM, C/N-Verhältnis 18	Humuswirtschaft Kaditz GmbH, Dresden
Pf.-Mist	Pferdemist	Strohanteil > 90 %, Häcksellänge des Strohs ~ 8 cm, Lagerungsdauer < 30 Tage im Mittel (n = 4): 32 % TM, 41 % C i.d. TM, C/N-Verhältnis 36	SG Schönfeld e.V., Dresden
zu Saatplatterbse eingesetzt ↓			
Stroh	Roggenstroh	Häcksellänge des Strohs ~ 5 cm, im Mittel (n = 2): 88 % TM, 45 % C i.d. TM, C/N-Verhältnis 88	Landwirtschaft W. Mühle, Hohnstein
zu Ackerbohne und Rotklee eingesetzt ↓			
Häcksel	Gehölzhäcksel	90 % des Materials mit einer Partikelgröße < 30 mm, Lagerungsdauer < 30 Tage, im Mittel (n = 2): 55 % TM, 43 % C i.d. TM, C/N-Verhältnis 53	Humuswirtschaft Kaditz GmbH, Dresden

¹ Bezeichnung der Prüfglieder in Tabellen und Abbildungen, ² Mittelwerte der organischen Düngemittel, Einzelwerte in Tab. A 5

Der verwendete Pferdemist wies einen hohen Strohanteil auf. Die Häcksellänge des Strohs betrug ca. 8 cm und die Lagerungsdauer des Pferdemistes weniger als 30 Tage. Im Mittel der eingesetzten Pferdemistpartien betrug deren TS-Gehalt 32 %, der Anteil an Kohlenstoff in der Trockenmasse 41 % und das C/N-Verhältnis 36.

Ausschließlich zu Saatplatterbse wurde ökologisch erzeugtes Roggenstroh mit einer Häcksellänge von etwa 5 cm ausgebracht. Verwendet wurde Stroh aus verschiedenen Erntejahren. Im Mittel lag der TS-Gehalt des Strohs bei 88 %, der Anteil an Kohlenstoff an der Trockenmasse betrug 45 % und das C/N-Verhältnis 88.

Ausschließlich zu Ackerbohne und Rotklee wurde das Häckselgut verschiedener Gehölzarten ausgebracht. Bei 80 % des Häckselgutes lag die Partikelgröße unter 30 mm, bei 10 % unter 50 mm und bei weiteren 10 % unter 100 mm. Bei dem verwendeten Häckselgut handelte es sich um frisch zerkleinertes Material mit einer Lagerungsdauer von weniger als 30 Tagen. Im Mittel wies der Gehölzhäcksel einen TS-Gehalt von 55 %, einen Kohlenstoffanteil in der Trockenmasse von 43 % und ein C/N-Verhältnis von 53 auf.

Die ermittelten Trockenmassen und die Gehalte an Kohlenstoff und Nährstoffen der organischen Düngemittel zu den einzelnen Versuchsanlagen in den Jahren 2008 bis 2010 sind in Tab. A 5 im Anhang aufgeführt. Die organischen Düngemittel Grüngutkompost, Pferdemist und Gehölzhäcksel wurden jeweils mit einer Aufwandmenge entsprechend einem Kohlenstoffäquivalent von 10 t ha^{-1} Kohlenstoff ausgebracht. Das Stroh wurde aufgrund des hohen Anteils an Kohlenstoff in der Trockenmasse, verbunden mit einer vergleichsweise hohen Menge an organischem Material je Flächeneinheit, mit einer Aufwandmenge entsprechend einem Kohlenstoffäquivalent von $4,3 \text{ t}$ im Jahr 2008 und von $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ Kohlenstoff im Jahr 2009 zu Saatplatterbse ausgebracht. In Tab. A 6 im Anhang sind die zu Saatplatterbse und in Tab. A 7 die zu Ackerbohne und Rotklee mit den Düngemitteln ausgebrachten Nährstoffmengen angegeben, welche aufgrund unterschiedlicher Gehalte an Kohlenstoff, Nährstoffen und an Trockensubstanz zwischen den Jahren teils erheblich variierten. So lag z.B. aufgrund des unterschiedlichen Anteils an Kohlenstoff in der Trockenmasse bei Grüngutkompost in den Jahren 2009 und 2010 zu Ackerbohne und Rotklee die mit dem Düngemittel ausgebrachte Menge an Kalium im Jahr 2010 44 % über der im Vorjahr ausgebrachten Menge. Für die Düngung mit Kalk wurde kohlensaurer Kalk mit einer Aufwandmenge von $5,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ CaCO}_3$ verwendet. In der nachfolgend als 'Mineral' bezeichneten Düngevariante wurde

weicherdiges Rohphosphat mit einem Anteil von 15 % P_2O_5 , 15 % $MgCO_3$ und 65 % $CaCO_3$ sowie Kaliumsulfat mit einem Anteil von 50 % K_2O und 18 % wasserlöslichem Schwefel eingesetzt. Die Aufwandmengen an Rohphosphat und Kaliumsulfat richteten sich nach den mit den organischen Düngemitteln ausgebrachten Nährstoffmengen im jeweils ersten Versuchsjahr. Die eingesetzten mineralischen Düngemittel waren zum Zeitpunkt der Versuchsanstellung auch für den ökologischen Landbau zugelassen (EG-VERORDNUNG Nr. 889, 2008).

2.4.2 Rotklee 2011 und 2012

Im Gefäßversuch mit Rotklee im Gewächshaus wurde im Jahr 2011 doppelt-markiertes Weizenstroh (^{15}N und ^{13}C) und Weizenstroh ohne Isotopen-Markierung der Sorte `Triso` verwendet. Zur Markierung des Strohs mit ^{15}N -Isotopen wurden die in Gefäßen kultivierten Weizenpflanzen im Vegetationszeitraum kontinuierlich mit ^{15}N -Ammoniumnitrat (NH_4NO_3 , 10 atom% ^{15}N) gedüngt. Zur Markierung des Strohs mit ^{13}C -Isotopen wurden die Weizenpflanzen zum Ende des Ährenschiebens (BBCH 59) in einem geschlossenen System dem Reaktionsprodukt von Bariumcarbonat ($BaCO_3$, 99 atom% ^{13}C) und Perchlorsäure ($HClO_4$) einmalig für einen Zeitraum von 60 Minuten ausgesetzt (GÖTZ et al. 2007). Die Kultivierung des Weizens, die Markierung mit ^{15}N bzw. ^{13}C -Isotopen und die Bereitstellung des Strohs für die Untersuchungen erfolgte durch Herrn Dr. K.-P. Götz an der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin. In Tab. 6 sind die ausgebrachten Mengen an Stroh sowie die Gehalte und gedüngten Mengen an Kohlenstoff und Stickstoff in den Düngevarianten angegeben (Untersuchungen im Gewächshaus). Der Anreicherungsgrad im ^{15}N -markierten Weizenstroh betrug 3,01266 atom% ^{15}N , der ^{13}C -Anreicherungsgrad 1,14325 atom% ^{13}C . Der Gehalt an Kohlenstoff in der Trockenmasse des markierten Strohs betrug 44,40 %, der Gehalt an Stickstoff 0,79 %. Die ausgebrachte Strohmenge betrug für das ^{15}N - und ^{13}C -markierte Stroh und für das Stroh ohne Isotopenmarkierung jeweils 29,0 g FM je Gefäß. In der Kontrolle wurde kein Stroh gedüngt.

Tab. 6: Ausgebrachte Mengen an Stroh (FM), Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff und Isotopensignatur des Strohs im Gefäßversuch (Gewächshaus) zu Rotklee im Jahr 2011

	Kontrolle ohne Strohdüngung	Stroh nicht markiert	Stroh $^{15}\text{N}/^{13}\text{C}$ -markiert
Stroh FM [g]	0,0	29,0	29,0
N-Menge [g]	-	0,22	0,20
N-Gehalt i.d. TM [%]	-	0,86	0,79
atom% ^{15}N	-	n.b.	3,01266
$\delta\text{‰ }^{15}\text{N}$	-	n.b.	7448,80
C-Menge [g]	-	11,15	10,97
C-Gehalt i.d. TM [%]	-	44,70	44,40
atom% ^{13}C	-	1,07934	1,14325
$\delta\text{‰ }^{13}\text{C}$	-	-29,00	29,10
C/N-Verhältnis Stroh	-	52	56

Im Gefäßversuch im Freiland mit Rotklee in den Jahren 2011 und 2012 wurde ^{13}C -markiertes Weizenstroh der Sorte `Baldus` mit einem Anteil von > 97 atom% ^{13}C am Kohlenstoff des Strohs verwendet. Der Kohlenstoffgehalt betrug 45,20 % und der Stickstoffgehalt 0,50 % in der Trockenmasse. Die Anreicherung der Weizenpflanzen mit ^{13}C -Kohlenstoff erfolgte mittels Langzeitmarkierung durch die Firma IsoLife BV aus Wageningen (NL). Für die Düngevariante mit Stroh ohne ^{13}C -Markierung wurde in beiden Versuchsjahren Weizenstroh (Sorte nicht bekannt) mit einem Gehalt von 45,30 % Kohlenstoff und 0,75 % Stickstoff in der Trockenmasse verwendet. Der natürliche Anreicherungsgrad an ^{13}C des Strohs lag bei 1,08076 atom% ^{13}C (Tab. 7).

Tab. 7: Ausgebrachte Mengen an Stroh (FM), Gehalte an Kohlenstoff und ^{13}C -Isotopensignatur des Strohs im Gefäßversuch (Freiland) zu Rotklee in den Jahren 2011 und 2012

	Kontrolle ohne Strohdüngung	Stroh nicht markiert	Stroh ^{13}C - markiert
Stroh FM [g]	0,0	12,5	12,5
C-Menge [g]	-	5,15	4,99
C-Gehalt i.d. TM [%]	-	45,30	45,20
atom% ^{13}C	-	1,08076	> 9,7
$\delta\text{‰ }^{13}\text{C}$	-	-27,7	>8549,8
C/N-Verhältnis Stroh	-	60	62

Um eine möglichst kontinuierliche Umsetzung des ausgebrachten Strohs in den Gefäßen zu gewährleisten, wurde das Material nur mit einem geringen Bodenvolumen vermengt und der applizierten Menge in Höhe von 1,25 g in der Variante mit ^{13}C -markiertem Stroh zusätzlich 11,25 g Stroh nicht ^{13}C -markiertes Stroh hinzugegeben. Die Menge an Stroh betrug dann einheitlich in jedem Gefäß der gedüngten Varianten 12,5 g. Für die Berechnung der strohbürtigen Kohlenstoffaufnahme durch den Rotklee wurde daher ein ^{13}C -Anreicherungsgrad des Strohs von 9,7 atom% zu Grunde gelegt.

2.5 Pflanzenmaterial

Die angewandte Methodik in den einzelnen Abschnitten sowohl hinsichtlich der Aufbereitung und Analyse des untersuchten Pflanzenmaterials, als auch zur Bodenatmung, zur Bodenchemie und zur statistischen Auswertung der ermittelten Daten wird nachfolgend versuchsübergreifend beschrieben.

2.5.1 Ertragsermittlung

Zur Ermittlung der oberirdischen Sprossmasse der Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras in den Jahren 2008 und 2009 wurden die Pflanzen auf einer Fläche von 8,1 m² je Parzelle bodennah mit einer Schere geerntet. Nach der Erfassung der Gesamtsprossmasse je Parzelle (Waage: Pesa, WT1-BR100-B2.2, 3 Genauigkeit: ± 10 g) wurde eine Teilprobe von ca. 800 g

entnommen. Nach erfolgter Bestimmung der Gesamtmasse der Teilprobe (Waage: Denver Instrument, SI-6002, Genauigkeit $\pm 0,01$ g) wurden die enthaltenen Unkräuter separiert und die Anteile an Leguminose und Unkräuter durch Wägung bestimmt. Bei der Referenzfrucht wurden die in sehr geringer Menge vorhandenen Unkräuter nicht separiert. Die Teilproben wurden in einem Trockenschrank (Heraeus-Kelvitron, Typ: UT 6760) bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und der TS-Gehalt festgestellt. Für die Ermittlung der Restfeuchte des bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ getrockneten Pflanzenmaterials wurden Teilproben bei $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Die Ermittlung der Sprossmasse des Rotklees in den Jahren 2009 und 2010 erfolgte analog zur Vorgehensweise bei der Saatplatterbse. Das Schnittgut des Rotklees wurde zu drei Terminen in jedem Versuchsjahr auf einer Fläche von $12,0\text{ m}^2$ mit Hilfe einer Sichel geerntet. Die Stoppeln des Rotklees wurden in beiden Versuchsjahren jeweils nach dem letzten Schnitt auf einer Fläche von $1,35\text{ m}^2$ mit Hilfe einer Schere geerntet. Die Beerntung der Referenzfrucht Welsches Weidelgras erfolgte auf einer Fläche von $5,4\text{ m}^2$. Die Gesamt-Sprossmasse des Rotklees und der Referenzfrucht wurde durch Addition der Schnittguterträge der Einzelschnitte (einschließlich der Stoppelmasse bei Rotklee) berechnet.

Die Ermittlung der Sprossmasse der Ackerbohne und der Referenzfrucht Spitzwegerich in den Jahren 2009 und 2010 erfolgte mittels Handbeerntung auf einer Fläche von $1,35\text{ m}^2$ je Parzelle. Die Anzahl Pflanzen und Hülsen der Ackerbohne der beernteten Fläche wurde durch Zählung von Hand erfasst. Die von der Sprossachse der Ackerbohnen entfernten Hülsen wurden anschließend mit einem Standdrescher (Firma Baumann Saatzucht, Typ: Saatmeister K 35) ausgedroschen. Die Stängel und die Druschreste jeder Probe wurden auf eine Häcksellänge von 30 mm zerkleinert und die Gesamtmasse ermittelt. Aus dem homogenen Häckselgut wurden Teilproben entnommen und im Trockenschrank bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Körner der Ackerbohne jeder Parzelle wurden ebenfalls bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ getrocknet und die Gesamtkornmasse ermittelt. Zur Feststellung der Tausendkornmasse wurden je Parzelle 4×100 Körner abgezählt und gewogen. Die Ermittlung der Tausendkornmasse erfolgte auf Basis der Trockenmasse der Körner bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ohne Berücksichtigung des Restfeuchtegehaltes. Zur Ermittlung des Anteils an Blättern am Spross der Ackerbohne, wurden am 13.07.2009 bzw. am 05.07.2010 Körbe (Boden mit Metallgitter) mit einer Fläche von $0,1\text{ m}^2$ zwischen die Pflanzen am Boden

abgelegt und bis zur Handernte zu vier Terminen geleert (Tab. A 1). Die so erhaltene Blattmasse wurde bei 60 °C getrocknet, gewogen und für die Berechnung des Strohanteils an der Sprossmasse der Ackerbohne berücksichtigt. Für die Feststellung des Korn- und Strohertrages wurden die Ackerbohnen auf der verbliebenen Fläche der Parzellen mittels Parzellenmähdrescher geerntet, die Kornmasse durch Wiegen ermittelt und eine Teilprobe bei 105 °C getrocknet. Der in den Ergebnissen dargestellte Kornertrag der Ackerbohne entspricht den Werten aus dem Parzellendrusch. Der in den Ergebnissen dargestellte Strohertrag je Parzelle wurde mit Hilfe der mit der Handernte ermittelten Anteile des Stroh am Spross und den Werten des Kornertrages aus dem Parzellendrusch berechnet.

Der nach allen Leguminosen folgende Winterweizen wurde nach Abreife der Körner in Form einer Handernte auf einer Fläche von 2,7 m² je Parzelle direkt oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten und die Ertragskomponenten (Anzahl Ähren, Kornertrag, Strohertrag und Tausendkornmasse) analog zur Vorgehensweise bei der Ackerbohne ermittelt. Nach der Handernte erfolgte der Parzellendrusch zur Erfassung des Kornertrages mit dem Parzellenmähdrescher auf einer Fläche von 6,8 m² nach der Vorfrucht Saatplatterbse und auf einer Fläche von 10,8 m² je Parzelle nach den Vorfrüchten Ackerbohne und Rotklee. Wie bei der Berechnung und Darstellung des Korn- und Strohertrages der Ackerbohne wurde auch der beim Parzellendrusch ermittelte Kornertrag des Winterweizens im Ergebnisteil dargestellt. Der Ertrag an Stroh wurde jeweils aus dem Korn/Stroh-Verhältnis der Proben der Handernte ermittelt. Für die Ermittlung der Schnittmengen an Rotklee in den Gefäßversuchen (2011 und 2012) wurden zu jedem Erntetermin alle Pflanzen je Gefäß ca. 3 cm über der Gefäßoberkante abgeschnitten. Der Schnittgutertrag des Rotklees wurde nach der Trocknung des Schnittgutes bei 60 °C im Trockenschrank ermittelt.

2.5.2 Inhaltsstoffanalysen der Pflanzen und Düngemittel

Alle durchgeführten Analysen der eingesetzten organischen Düngemittel und der untersuchten Pflanzen in den Jahren 2008 bis 2011 sind in Tab. A 3 im Anhang aufgeführt. Für die Bestimmung der Gehalte an Gesamtkohlenstoff (C_t) und Gesamtstickstoff (N_t) im Pflanzenmaterial wurden die zur Ertragsermittlung entnommenen Pflanzenproben der Saatplatterbse (Schnittgut und Unkraut), der Ackerbohne (Korn, Stroh, Blatt und Unkraut), des Rotklees (Schnittgut zu drei

Terminen und Stoppelmasse) und des Winterweizens (Korn und Stroh) verwendet. Die Gehalte an C_t und N_t in der Sprossmasse der Pflanzen wurden in analoger Weise für die jeweiligen Referenzkulturen der Leguminosen und die eingesetzten organischen Düngemittel bestimmt. Die Proben wurden nach der Trocknung bei 60 °C in zwei Arbeitsschritten mit einer Siebgröße von 5 mm grob (Schneidmühle SM 1, Firma Retsch) und mit einer Siebgröße von 0,2 mm fein vermahlen (Zentrifugalmühle ZM 1000, Firma Retsch). Die Bestimmung der Gehalte an Kohlenstoff erfolgte nach der Methode DIN ISO 10694: 1996-08, die Bestimmung der Gehalte an Stickstoff nach VDLUFA Methodenbuch III, Methode 4.1.2 (DUMAS-Verbrennungsmethode) mit Hilfe eines CN-Analysators (Truc-Spec, Firma Leco) durch die staatliche Betriebsgesellschaft für Landwirtschaft und Umwelt in Leipzig (BfUL). Die Proben wurden dabei unter Zufuhr von Sauerstoff bei Temperaturen von 900 bis 1.500 °C verbrannt und das entstehende Kohlendioxid bzw. die Stickoxide nach der Entfernung störender Verbrennungsprodukte und der Trennung der Gasfraktionen mittels Infrarot-Detektor erfasst.

Für die Analyse der Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel, Molybdän und Bor im Rotklee wurden in jedem Versuchsjahr Mischproben des Gesamt-Sprossertrages mit den gewichteten Mitteln des Schnittgutes zu jedem Schnitttermin und den Stoppeln gebildet. Zusätzlich zu den Mischproben des Gesamt-Sprossertrages wurden die genannten Nährstoffe im Schnittgut des ersten Schnittes des Rotklees in jedem Versuchsjahr gesondert bestimmt. Die Bestimmung der Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel erfolgte nach VDLUFA Methodenbuch III, Methode 10.8.3 (6. Ergänzungslieferung 2006) mit Hilfe eines Röntgenspektrometers (Tiger S8, Firma Bruker). Die Bestimmung der Gehalte an Molybdän und Bor erfolgte nach VDLUFA Methodenbuch VII, Methode 2.2.2.5 (2007) mittels Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (IPC-MS, DRC-e, Firma PerkinElmer).

Zur Untersuchung des Nährstoff-Versorgungszustandes der Pflanzen wurden in den Jahren 2009 (BBCH 65) und 2010 (BBCH 73) bei der Ackerbohne in allen Düngevarianten die jüngsten entfalteten Blätter (etwa 25 Blätter je Parzelle) entnommen. Die Blattmasse wurde bei 60 °C getrocknet und auf eine Partikelgröße von kleiner 0,2 mm vermahlen. Zur Bestimmung aller Nährstoffe wurden die Proben durch ein Säuredruckaufschlussverfahren mit Salpetersäure (65 % HNO_3) zur Analyse vorbereitet. Die Bestimmung der Nährstoffgehalte erfolgte anschließend für

Stickstoff und Schwefel mittels CNS-Analysator (Euro-EA, Firma Hekatech), für Phosphor mittels Molybdänblau-Methode am Flammenfotometer (Ecom 6122, Firma Eppendorf), für Kalium mittels Flammen-Fotometer (Elex 6361, Firma Eppendorf), für Magnesium mittels Atomabsorptionsspektrometer (1100B, Firma PerkinElmer), für Molybdän mittels Massenspektrometer (IPC-OES, Firma Horiba Jobin Yvon, Modell Ultima 2) und für Bor nach der Curcumin-Methode mittels UV/VIS Spektrometer (Lambda 20, Firma PerkinElmer). Die Nährstoffanalysen in den Blättern der Ackerbohne wurden von Frau Claudia Seehuber (Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn) durchgeführt. Die Berechnung der entzogenen Nährstoffmengen durch die Saatplatterbse und den Rotklee erfolgte unter Einbeziehung der ermittelten Nährstoffgehalte und der ermittelten Sprosserträge auf Basis der Trockenmasse.

2.5.3 Bestimmung der symbiotischen N₂-Fixierung

Zur Schätzung der symbiotischen N₂-Fixierung des Rotklees und der Ackerbohne wurde die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (natural ¹⁵N abundance method) verwendet. Zur Schätzung der N₂-Fixierleistung der Saatplatterbse wurde aus Kostengründen die einfache Differenzmethode verwendet.

2.5.3.1 Einfache Differenzmethode

Die Bestimmung der symbiotischen N₂-Fixierung erfolgte für die Saatplatterbse nach der einfachen Differenzmethode (Gleichung 1, STÜLPNAGEL 1982). Die N-Menge der Referenzkultur (N_{ref}) wurde aus dem geernteten Schnittgut des Welschen Weidelgrases ohne Separierung des Unkrautes ermittelt.

$$N_{\text{fix}} \left[\text{kg ha}^{-1} \right] = N_{\text{Leg}} + N_{\text{UK}} - N_{\text{Ref}} \quad (1)$$

N_{Leg} = Gesamt-N Menge der Leguminose im Spross [kg ha⁻¹]

N_{UK} = Gesamt-N Menge Unkraut Leguminosen [kg ha⁻¹]

N_{Ref} = Gesamt-N Menge der Referenzpflanze [kg ha⁻¹].

2.5.3.2 $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (natural ^{15}N abundance method)

Der Anteil an symbiotisch fixiertem Stickstoff am Spross-N der Ackerbohne und des Rotklees wurde verändert nach der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode nach SHEARER & KOHL (1986) ermittelt:

$$N_{\text{dfa}} = \frac{(\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Leg}})}{(\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \delta^{15}\text{N}_0)} \quad (2)$$

N_{dfa} = Anteil Stickstoff aus der Luft im Spross der Leguminose

$\delta^{15}\text{N}_{\text{Leg}}$ = $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Spross der Leguminose [‰]

$\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}}$ = $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Spross der Referenzpflanze [‰]

$\delta^{15}\text{N}_0$ = $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der auf N-freiem Nährmedium gewachsenen Leguminose [‰]

Die Grundlage für die Schätzung der N_2 -Fixierung nach dieser Methode (natural ^{15}N abundance method) ist ein stabiler Anteil von 0,3663 atom% an schweren, nicht radioaktiven ^{15}N -Isotopen am Luftstickstoff und die auf vielen Standorten gegebene natürliche Anreicherung von ^{15}N -Isotopen in der organischen Substanz des Bodens. Die bei der symbiotischen N_2 -Fixierung auftretende Fraktionierung der ^{15}N -Isotope wurde berücksichtigt, indem vom $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminose und der Referenzkultur jeweils ein auf die Leguminose bezogener Korrekturwert abgezogen wurde. Dieser Wert wurde durch eine Kultivierung der Leguminose auf einem N-freien Nährmedium ermittelt und gibt die art- und sortenspezifische Abreicherung von ^{15}N -Stickstoff am Gesamt-N der Pflanzen aufgrund der Fraktionierung schwerer ^{15}N -Isotope bei der Aufnahme von molekularem Luftstickstoff und der innerpflanzlichen Verteilung wieder. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Korrekturwert von -0,0403 ‰ für die hier im Versuch genutzte Ackerbohne der Sorte `Fuego` wurde nach experimentellen Erhebungen von JOST (2003) als arithmetisches Mittel von drei untersuchten Sorten der Ackerbohne berechnet. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Korrekturwert von -0,6753 ‰ für den Rotklee der Sorte `Titus` wurde von JUNG (2003) experimentell bestimmt. Durch Multiplikation des errechneten N-Anteils aus der Luft mit der Spross-N-Menge der Leguminosen wurde die absolute Menge an fixiertem Stickstoff (N_{fix}) errechnet (Gleichung 3).

$$N_{\text{fix}} [\text{kg ha}^{-1}] = N_{\text{dfa}} \times N_{\text{Leg}} \quad (3)$$

N_{fix} = symbiotisch fixierte N-Menge im Spross der Leguminose [kg ha^{-1}]

N_{Leg} = Gesamt-N Menge der Leguminose im Spross [kg ha^{-1}]

Die Berechnung der prozentualen Anteile von symbiotischer N₂-Fixierung (N_{dfa} - nitrogen derived from the atmosphere) und der Aufnahme an bodenbürtigem Stickstoff (N_{dfs} - nitrogen derived from the soil) erfolgte nach REITER (2002) durch Division des Mittelwertes der symbiotisch fixierten N-Menge einer Variante durch den Mittelwert des Spross-N der Leguminose einer Variante:

$$N_{dfa}V = \frac{N_{fix_1} + N_{fix_2} \dots + N_{fix_n}}{N_{Leg_1} + N_{Leg_2} \dots + N_{Leg_n}} \times 100 \quad (4)$$

$$N_{dfs}V = 100 - N_{dfa}V \quad (5)$$

N_{dfa}V = gewogener Anteil an Stickstoff aus der Luft im Spross der Leguminose einer Variante [%]

N_{dfs}V = gewogener Anteil an Stickstoff aus dem Boden im Spross der Leguminose einer Variante [%]

N_{fix_n} = Mittelwert der symbiotisch fixierten N-Menge im Spross der Leguminose einer Variante [kg ha⁻¹]

N_{Leg_n} = Mittelwert des Spross-N der Leguminose einer Variante [kg ha⁻¹].

2.5.4 Bestimmung des ¹⁵N- und ¹³C-Anreicherungsgrades

Für die Bestimmung der Isotopenmassenverhältnisse ¹³C/¹²C und ¹⁵N/¹⁴N der untersuchten Pflanzen und organischen Düngemittel wurde das bei 60 °C getrocknete und auf eine Partikelgröße von ≤ 0,2 mm vermahlene Material in Zinnkapseln der Größe 5 × 9 mm (Firma IVA Analysentechnik, Meerbusch) eingefüllt und mit einer Feinwaage (Mettler Toledo XA 105 Dual Range) mit einer Genauigkeit von ± 0,01 mg eingewogen. Die eingewogenen Mengen an pflanzlichem Material richteten sich nach der für die Analyse optimalen Menge an C (500 µg C) für die Bestimmung des ¹³C/¹²C-Isotopenverhältnisses und von 100 µg N je Probe für die Bestimmung der ¹⁵N/¹⁴N-Isotopenverhältnisse.

Die Analyse der Pflanzen- und Düngemittelproben hinsichtlich stabiler ¹³C/¹²C- und ¹⁵N/¹⁴N-Isotopenverhältnisse erfolgte in der UC Davis Stable Isotope Facility mittels PDZ Europa ANCA-GSL Element-Analyzer in Verbindung mit einem PDZ Europa 20-20 Isotopen-Massenspektrometer (Firma Sercon Ltd., Cheshire, UK) In den USA.

2.5.5 Berechnung der Stickstoffaufnahme aus der Strohdüngung mit ^{15}N -Markierung

Für den Gefäßversuch mit Rotklee unter teilkontrollierten Bedingungen im Jahr 2011 wurde mit der von SCHMIDTKE (2005) veränderten Gleichung 6 nach JANZEN & BRUINSMA (1989) der aus dem gedüngten (^{15}N -markierten) Stroh stammende Anteil des Stickstoffs am Schnittgut-N des Rotklees ($^{15}\text{N}_{\text{RKS}}$) berechnet.

$$^{15}\text{N}_{\text{RKS}} [\%] = \frac{(\text{RK}_m - \text{RK}_{nm})}{(\text{Stroh}_m - \text{RK}_{nm})} \times 100 \quad (6)$$

RK_m = ^{15}N -Anreicherung Rotkleeschnittgut mit Düngung von ^{15}N -markiertem Stroh [atom% ^{15}N]

RK_{nm} = ^{15}N -Anreicherung Rotkleeschnittgut mit Strohdüngung ohne ^{15}N -Markierung [atom% ^{15}N]

Stroh_m = ^{15}N -Anreicherungsgrad des gedüngten ^{15}N -markierten Strohs [atom% ^{15}N]

Vom ermittelten Anreicherungsgrad an ^{15}N -Isotopen im geernteten Rotklee und vom Anreicherungsgrad an ^{15}N -Isotopen im gedüngten Stroh (in der Variante mit ^{15}N -Markierung) wurde jeweils der ^{15}N -Anreicherungsgrad des mit Stroh ohne ^{15}N -Markierung gedüngten Rotklees subtrahiert. In der Düngevariante mit Stroh ohne ^{15}N -Markierung wurde damit ein Hintergrundwert bzw. ein versuchsspezifischer Standard für jede Wiederholung erzeugt, welcher die unter den tatsächlichen Versuchsbedingungen auftretende natürliche ^{15}N -Anreicherung im Rotklee berücksichtigt. Die Menge des aus dem gedüngten Stroh stammenden Stickstoffs (N_{RKS}) berechnet sich aus der Trockenmasse des Rotklee-Schnittgutes, dem Anteil an Stickstoff in der Trockenmasse des Rotklee-Schnittgutes und dem Anteil an Stickstoff im Schnittgut-N aus dem gedüngten Stroh (Gleichung 7).

$$\text{N}_{\text{RKS}} [\text{g}] = \text{Schnittgut}_{\text{RK}} \times \text{N}_{\text{RK}} \times ^{15}\text{N}_{\text{RKS}} \quad (7)$$

$\text{Schnittgut}_{\text{RK}}$ = Trockenmasse des Rotkleeschnittgutes [g]

N_{RK} = Anteil Stickstoff in der Trockenmasse des Rotkleeschnittgutes

$^{15}\text{N}_{\text{RKS}}$ = strohbürtiger Anteil Stickstoff am Rotklee-Stickstoff

$\text{Spross-TM}_{\text{Stroh}}$ = Trockenmasse des gedüngten Strohs [g]

Der Anteil des durch den Rotklee aufgenommenen Stickstoffs aus dem gedüngten Stroh (N_{RKS}) wurde unter Einbeziehung der Menge an gedüngtem Stroh und dem prozentualen Anteil an Stickstoff im Stroh ermittelt (Gleichung 8).

$$N_{RKS} [\%] = \frac{N_{RKS}}{(Spross-TM_{Stroh} \times N_{Stroh})} \times 100 \quad (8)$$

2.5.6 Berechnung der Kohlenstoffaufnahme aus Strohdüngung mit ^{13}C -Markierung

Für die Gefäßversuche mit Rotklee unter teilkontrollierten Bedingungen im Gewächshaus im Jahr 2011 und im Freiland in den Jahren 2011 und 2012 wurde analog zu den Berechnungen zum Stickstoff (Gleichung 6 bis 8) der aus dem gedüngten (^{13}C -markierten) Stroh stammende Anteil des Kohlenstoffs am Schnittgut-C des Rotklees ($^{13}\text{C}_{RKS}$) berechnet (Gleichung 9).

$$^{13}\text{C}_{RKS} [\%] = \frac{(RK_{ma} - RK_{nma})}{(Stroh_{ma} - RK_{nma})} \times 100 \quad (9)$$

RK_{ma} = ^{13}C -Anreicherung Rotkleeschnittgut mit Düngung von ^{13}C -markiertem Stroh [atom% ^{13}C]

RK_{nma} = ^{13}C -Anreicherung Rotkleeschnittgut mit Strohdüngung ohne ^{13}C -Markierung [atom% ^{13}C]

$Stroh_{ma}$ = ^{13}C -Anreicherungsgrad des gedüngten ^{13}C -markierten Strohs [atom% ^{13}C]

Vom ermittelten ^{13}C -Anreicherungsgrad im geernteten Rotklee und im gedüngten Stroh (in der Variante mit ^{13}C -Markierung) wurde jeweils der ^{13}C -Anreicherungsgrad des mit Stroh ohne ^{13}C -Markierung gedüngten Rotklees subtrahiert. Wie beim Stickstoff wurde auch mit der Düngevariante mit Stroh ohne ^{13}C -Markierung ein versuchsspezifischer Standard für jede Wiederholung erzeugt, welcher die unter den tatsächlichen Versuchsbedingungen auftretende natürliche ^{13}C -Anreicherung im Rotklee berücksichtigt. Die Menge des aus dem gedüngten Stroh stammenden Kohlenstoffs (C_{RKS}) berechnete sich aus der Trockenmasse des Rotklee-Schnittgutes, dem Anteil an Kohlenstoff in der Trockenmasse des Rotklee-Schnittgutes und dem Anteil an Kohlenstoff im Schnittgut-C aus dem gedüngten Stroh (Gleichung 10).

$$C_{RKS} [g] = \text{Schnittgut}_{RK} \times C_{RK} \times {}^{13}C_{RKS} \quad (10)$$

Schnittgut_{RK} = Trockenmasse des Rotklee-Schnittgutes [g]

C_{RK} = Anteil Kohlenstoff in der Trockenmasse des Rotklee-Schnittgutes

${}^{13}C_{RKS}$ = strohbürtiger Anteil Kohlenstoff am Rotklee-Kohlenstoff

Der Anteil des durch den Rotklee aufgenommenen Kohlenstoffs aus dem gedüngten Stroh (C_{RKS}) wurde unter Einbeziehung der Menge an gedüngtem Stroh und dem prozentualen Anteil an C im Stroh ermittelt (Gleichung 11).

$$C_{RKS} [\%] = \frac{C_{RKS}}{\text{Spross-TM}_{\text{Stroh}} \times C_{\text{Stroh}}} \times 100 \quad (11)$$

C_{RKS} = Menge strohbürtiger Kohlenstoff im Rotklee [g]

$\text{Spross-TM}_{\text{Stroh}}$ = gedüngte Stroh-TM zu Rotklee [g]

C_{Stroh} = Anteil Kohlenstoff in der gedüngten Stroh-TM

2.6 Scheinbare Nährstoffausnutzung

Die scheinbare Ausnutzung der mit den Düngern zugeführten Mengen an Einzelnährstoffen zu Saatplatterbse und Rotklee wurde mit der Differenzmethode nach BROESHART (1974) geschätzt:

$$\text{Scheinbarer Ausnutzungsgrad} [\%] = \frac{\text{Aufnahme}_{\text{Düng}} - \text{Aufnahme}_{\text{Kon}}}{\text{Nährstoffmenge Dünger}} \times 100 \quad (12)$$

$\text{Aufnahme}_{\text{Düng}}$ = Nährstoffaufnahme im Spross der gedüngten Variante [kg ha^{-1}]

$\text{Aufnahme}_{\text{Kon}}$ = Nährstoffaufnahme im Spross der Kontrolle [kg ha^{-1}]

Nährstoffmenge Düngemittel = gedüngte Menge des Nährstoffs [kg ha^{-1}]

Die Schätzung der scheinbaren Nährstoffausnutzung bezieht sich nur auf die ermittelten Mengen im Spross der Leguminosen. Unterstellt wird dabei, dass die Aufnahme der Nährstoffe aus bodenbürtiger Quelle durch die Düngung nicht verändert wird (KUZYAKOV et al. 2000). Für die Schätzung der Scheinbaren N-Ausnutzung wurde ausschließlich die bodenbürtige N-Menge genutzt.

2.7 Ernteindex

Der Ernteindex als Verhältnis des Samenanteils der Gesamtpflanze zur oberirdischen Spross-TM wurde berechnet in Anlehnung an DONALD & HAMBLIN (1976) und HAAS & FRIED (1990) nach:

$$\text{Ernteindex [\%]} = \frac{\text{Kornertrag}}{\text{Kornertrag} + \text{Strohertrag}} \times 100 \quad (13)$$

Kornertrag = Korntrockenmasse [dt ha⁻¹]

Strohertrag = Strohtrockenmasse [dt ha⁻¹]

2.8 Bodenatmung

Zur Ermittlung der Bodenatmung im Feld wurden nach der Saat der Saatplatterbse im Jahr 2008, der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010 und des Rotklees in den Jahren 2011 und 2012 in allen Düngevarianten, einschließlich der Kontrolle ohne Düngung, jeweils 10 Messpunkte je Parzelle in einem Abstand von 1 m zueinander festgelegt. An jedem Messpunkt wurde ein PVC-Rohr mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 5 cm in den Boden eingelassen. Die Oberfläche innerhalb des Messpunktes und in einem Radius von 10 cm um den Messmittelpunkt wurde in allen Kulturen von Hand vegetationsfrei gehalten, um den Einfluss der Wurzelatmung und der Umsetzung von wurzelbürtiger organischer Substanz im Bereich des Messpunktes zu minimieren. Die Messungen der CO₂-Entbindung aus dem Boden wurden mit einem transportablen Gaswechsel-Messgerät der Firma PP-Systems (USA) vom Typ `Ciras 2` durchgeführt. Für jede Messung wurde der Messzylinder mit einem Volumen von 1171,0 cm³ und einer Grundfläche von 78,5 cm² auf einen in den Boden eingelassenen PVC-Ring aufgesetzt. Für einen Zeitraum von maximal 120 Sekunden wurde mittels eines Lüfters im Zylinder die über dem Messpunkt befindliche Luft in das Messgerät geleitet. Erfasst wurde vom Messgerät kontinuierlich die CO₂-Konzentration der Luft im Zylinder zu Beginn und während der Messung. Die Höhe der Bodenatmung wurde geräteintern nach dem Verhältnis der Änderung der CO₂-Konzentration zur Messdauer unter Einbeziehung des Systemvolumens und der Bodenoberfläche berechnet (PARKINSON 1981):

$$R = \frac{C_n - C_0}{T_n} \times \frac{V}{A} \quad (14)$$

R = Rate der Bodenatmung [g CO₂ m⁻² h⁻¹]

C_n = CO₂-Konzentration zum Zeitpunkt T_n [ppm]

C₀ = CO₂-Konzentration zum Zeitpunkt T₀ [ppm]

T_n = Messzeitpunkt (n Sekunden nach T₀) [s]

V = Systemvolumen [cm³]

A = Messfläche [cm²]

Berechnungsgrundlage ist ein linearer Anstieg der CO₂-Konzentration im Messzylinder (dC/dT). Gemessen wurde jeweils zwischen 8:00 und 14:00 Uhr des Messtages mit einem zeitlichen Abstand von mindestens 72 Stunden zum letzten Niederschlag. In der Saatplatterbse wurden im Jahr 2008 sieben Messungen, in der Ackerbohne im Jahr 2009 vier Messungen und in der Ackerbohne im Jahr 2010 fünf Messungen zu unterschiedlichen Terminen durchgeführt (Tab. A 1). Im Rotklee erfolgten acht Messungen im Jahr 2011 und fünfzehn Messungen im Jahr 2012 (Termine in Tab. A 44 ersichtlich).

2.9 Bodenchemische Untersuchung

Die Beschreibung der bodenchemischen Untersuchungen gliedert sich in die Analysen zur Ermittlung der Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor, Kalium, Magnesium, den Gehalten an Gesamtkohlenstoff und -stickstoff sowie dem pH-Wert im Boden und in die Beschreibung der Bestimmung des N_{min}-Vorrates im Boden.

2.9.1 Bodenanalysen

Die chemischen Analysen des Bodens wurden von der BfUL in Leipzig durchgeführt. Die Mengen an pflanzenverfügbarem Phosphor und Kalium im lufttrockenen Boden wurden nach VDLUFA Methodenbuch I, Methode A 6.2.1.1 mit Hilfe des Autoanalysers 3 (Firma SEAL) durchgeführt. Als Extraktionsmittel wurde für die Phosphor- und Kalium-Bestimmung Calciumacetatlactat (0,1 M Ca-Lactat, 0,1 M Ca-Acetat, 0,3 M Essigsäure) verwendet. Die Bestimmung der Mengen an pflanzenverfügbarem Magnesium im Boden erfolgte nach VDLUFA Methodenbuch I, Methode A 6.2.4.1 mit Hilfe eines Continuous Flow Analyzers (CFA SAN⁺⁺, Firma Skalar) unter Verwendung einer 0,0125 M CaCl₂-Lösung als Extraktionsmittel. Die

Ermittlung der Gehalte an Gesamt-Kohlenstoff im Boden erfolgte nach DIN ISO 10694-1995 und der Gehalte an Gesamt-Stickstoff nach DIN ISO 13878-1998-11 mit Hilfe eines CN-Analysators (TruSpec, Firma Leco). Die Bestimmung des pH-Wertes im Boden erfolgte nach VDLUFA Methodenbuch I, Methode A 5.1.1 mittels Minilab (Firma ROHASYS, NL) unter Verwendung von 0,01 molarer CaCl_2 -Lösung als Extraktionsmittel.

2.9.2 N_{\min} -Vorrat im Boden

Für die Erfassung der N_{\min} -Mengen im Boden wurden je Parzelle vier gestörte Bodenproben in einer Tiefe von 0 bis 90 cm mit Hilfe eines Pürckhauer Bohrstockes entnommen. Je Einschlag wurde aus dem Bohrstock Boden der Tiefenstufen 0 bis 30 cm, 30 bis 60 cm und 60 bis 90 cm entnommen und eine Mischprobe aus den vier Einzelproben je Parzelle gebildet. Die Proben wurden sofort nach der Entnahme aus dem Boden in Kühlbehältern verwahrt und nach der Probennahme bis zur Analyse bei $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ in einer Gefriertruhe aufbewahrt. Für die Aufarbeitung bzw. Analyse wurde der gefrorene Boden kurzzeitig angetaut und von Hand homogenisiert. Die Ermittlung der Trockensubstanz des Bodens erfolgte gravimetrisch nach Gleichung 15. Die Trocknung des Bodens erfolgte mit einer Masse von ca. 50 g feuchten Bodens je Probe bei $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Trockenschrank bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz.

$$TS_{\text{Boden}} = 1 - \frac{\text{Boden}_{\text{feucht}} - \text{Boden}_{\text{trocken}}}{\text{Boden}_{\text{trocken}}} \quad (15)$$

TS_{Boden} = Trockensubstanzgehalt des Bodens

$\text{Boden}_{\text{trocken}}$ = Gewicht des Bodens getrocknet bei $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ [g]

$\text{Boden}_{\text{feucht}}$ = Gewicht des feuchten Bodens [g]

Für die Ermittlung der Mengen an Nitrat-N und Ammonium-N im Boden wurde je Probe 100 g feuchten Bodens mit 250 ml einer 0,01-molaren CaCl_2 -Lösung für einen Zeitraum von 60 Minuten in einem Überkopfschüttler durchmischt. Anschließend wurde die Lösung durch einen Faltenfilter (MN 615 $\frac{1}{4}$, 150 mm) gefiltert und die so erhaltene Messlösung in PE-Röhrchen mit einem Volumen von 10 ml bei $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiefgefroren. Die Bestimmung der Konzentration an NO_3^- bzw. NH_4^{++} -Ionen in der Messlösung erfolgte mittels Continuous Flow Analyzer (CFA SAN⁺⁺, Firma Skalar) durch die BfUL in Leipzig. Für die Herstellung der 0,01-molaren CaCl_2 -Lösung

wurden 1,47 g Calciumchlorid-Dihydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $M = 147,02 \text{ g mol}^{-1}$) in 1 Liter entionisiertes Wasser mit einer Leitfähigkeit $\leq 0,2 \text{ }\mu\text{S}$ gegeben und gelöst. Die Menge an Ammonium-N und Nitrat-N im Boden wurde nach der Bestimmung der Ionen-Konzentration in der Messlösung für jede Tiefenstufe nach Gleichung 16 bzw. 17 berechnet.

$$N_{\text{NO}_3^-} [\text{kg ha}^{-1}] = c_{\text{LNO}_3^-} \times d \times \frac{\rho}{\text{TS}_{\text{Boden}}} \times f \times S \quad (16)$$

$$N_{\text{NH}_4^+} [\text{kg ha}^{-1}] = c_{\text{LNH}_4^+} \times d \times \frac{\rho}{\text{TS}_{\text{Boden}}} \times f \times S \quad (17)$$

$N_{\text{NO}_3^-}$ = Menge Nitrat-N im Boden

$N_{\text{NH}_4^+}$ = Menge Ammonium-N im Boden

$c_{\text{LNO}_3^-}$ = NO_3^- -Ionen in der Messlösung [$\text{mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$]

$c_{\text{LNH}_4^+}$ = NH_4^+ -Ionen in der Messlösung [$\text{mg NH}_4\text{-N l}^{-1}$]

d = Mächtigkeit der beprobten Schicht [dm]

ρ = Lagerungsdichte des Bodens in der beprobten Schicht [g cm^{-3}]

f = Verhältnis Bodeneinwaage zu CaCl_2 -Lösung [g ml^{-1}]

S = Steingehalt des Bodens [%]

Im Ergebnisteil werden sowohl für die Saatplatterbse als auch für die Ackerbohne und den Rotklee die N_{min} -Vorräte im Boden jeweils nur für eine Tiefe bis 60 cm angegeben, da zu einzelnen Terminen aufgrund zu hoher Bodenfeuchte trotz mehrfacher Einstiche kein Boden aus der Tiefenstufe 60 bis 90 cm geborgen werden konnte. Für die Saatplatterbse sind jeweils nur die N_{min} -Vorräte im Boden nach der Ernte der Saatplatterbse und nach der Ernte des nachfolgenden Weizens ermittelt worden. Für die Ackerbohne und den Rotklee erfolgte zusätzlich eine Bestimmung der N_{min} -Vorräte im Boden etwa 40 Tage nach der Saat der Leguminosen sowie im Frühjahr des Folgejahres.

2.10 Statistische Methoden

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit der SAS Programmversion 9.3 des SAS Institute Inc. (2013) durchgeführt. Der Test auf Normalverteilung der Daten erfolgte mit Hilfe des Shapiro-Wilk Tests. Die Auswertung wurde mittels Varianzanalyse und anschließend F-Test durchgeführt. Der anschließende

multiple Vergleich der Mittelwerte erfolgte mit Hilfe des Tukey-Tests. Unbalancierte Datensätze wurden mit Hilfe des Scheffè-Tests ausgewertet. Nicht normalverteilte Daten wurden nach der Transformation mittels Wurzelfunktion ($x' = \sqrt{x}$) oder der logarithmischen Funktion ($x' = \log(x)$) normalisiert (MUNZERT 1992). Nicht normalverteilte Daten ohne erfolgreiche Transformation wurden mit Hilfe der Rangvarianzanalyse nach Friedman ausgewertet. Signifikante Unterschiede zwischen den getesteten Varianten wurden, wenn nicht anders angegeben, für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,05$ ermittelt und sind durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet. Alle graphischen Darstellungen wurden mit dem Programm SigmaPlot, Version 11.0 (Systat Software Inc. 2008) erstellt.

3 Ergebnisse

Die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit wurden größtenteils in identischer Form, aber jeweils in zwei Jahren zeitlich versetzt an Saatplatterbse (Juli bis Oktober), Ackerbohne (März / April bis August) und Rotklee (März / April bis Oktober) durchgeführt. Daher werden im Folgenden die Ergebnisse für die Saatplatterbse mit nachfolgendem Winterweizen einzeln und für die Ackerbohne und den Rotklee - ebenfalls mit nachfolgendem Winterweizen - gemeinsam dargestellt. Die Ergebnisse zur Bodenatmung und zur Quantifizierung der Aufnahme von Kohlenstoff aus den organischen Düngemitteln werden für die Feldversuche mit Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2008 bis 2010 und für die Gefäßversuche mit Rotklee in den Jahren 2011 und 2012 jeweils in eigenen Kapiteln dargestellt, um Zusammenhänge hinsichtlich der Fragestellung als auch der Untersuchungsmethoden zu verdeutlichen. Sofern nicht anders gekennzeichnet, sind in sämtlichen Abbildungen und Tabellen jeweils die arithmetischen Mittelwerte der Wiederholungen in den Prüfgliedern und als Streuungsmaß der jeweilige Standardfehler angegeben.

3.1 Saatplatterbse und Nachfrucht Winterweizen

Die Ergebnisse zur Saatplatterbse umfassen die Spross-TM der Leguminosen und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras, sowie die N_{\min} -Mengen im Boden nach Ernte der Saatplatterbse und des Winterweizens. Dargestellt werden die Gehalte der Makronährstoffe Phosphor, Kalium, Schwefel, des Spurennährstoffes Molybdän im Spross der Saatplatterbse und die entzogenen Mengen der genannten Nährstoffe zum Zeitpunkt der Ernte. Dem folgen die Ergebnisse zur Bodenatmung und zur Quantifizierung der Aufnahme von Kohlenstoff aus den organischen Düngemitteln. Weiterhin werden die Ergebnisse zur boden- und luftbürtigen N-Aufnahme der Saatplatterbse sowie die Spross-TM und N-Aufnahme der Folgefrucht Winterweizen dargestellt.

3.1.1 Ertrag der Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras

Im Jahr 2008 lag der Feldaufgang der Saatplatterbse im Mittel der Prüfglieder außer nach Strohdüngung bei 76 % (Tab. 8). Im Mittel der Jahre führte die Strohdüngung zu Saatplatterbse mit 44 dt ha^{-1} zur geringsten Spross-TM im Vergleich aller Prüfglieder.

Tab. 8: Einfluss der Düngung auf den Feldaufgang der Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009

Feldaufgang Saatplatterbse [%]						
Jahr	Prüfglieder					
	Kontrolle	Kalk	Mineral	Kompost	Pferdemist	Stroh
2008	73,5 a	72,3 a	80,8 a	77,0 a	77,3 a	34,8 b
2009	72,8 A	76,5 A	77,0 A	80,3 A	53,5 A	45,0 A

Tukey-Test, $\alpha < 0,05$

Nach der Strohdüngung lag der Feldaufgang der Saatplatterbse im Jahr 2008 mit 34,8 % signifikant unter dem Wert der anderen Prüfglieder. Auch im Jahr 2009 war nach der Düngung von Stroh und Pferdemist ein deutlich geringerer Feldaufgang im Vergleich der Prüfglieder zu verzeichnen. Die applizierte Menge an Stroh-TM von etwa 1 kg m² (Pferdemist 2,5 kg m² TM im Jahr 2009) vor der Saat verbunden mit einer geringen Einarbeitungstiefe führte dazu, dass die Samen der Saatplatterbse unmittelbar von einer hohen Menge an grob strukturiertem organischen Material umgeben waren. Es ist anzunehmen, dass aus diesem Grund teilweise ein zu geringer direkter Bodenkontakt der Samen zu einer ungenügenden Wasserversorgung und somit zu einem verminderten Feldaufgang führten, was offenbar auch die Ursache für die im Mittel der Jahre geringere Spross-TM der Saatplatterbse in dieser Variante war (Abb. 4, Tab. A 16). Die Spross-TM des Welschen Weidelgrases unterschied sich im Mittel der Jahre nicht signifikant zwischen den Prüfgliedern. Sowohl die Düngung von Stroh, als auch die Düngung mit Pferdemist zeigte hier keine negativen Effekte auf die Spross-TM, was darauf hindeutet, dass die Samen des Welschen Weidelgrases aufgrund der vergleichsweise geringen Größe und eines geringen Wasserbedarfes für die Keimung bessere Keimbedingungen im Vergleich zur Saatplatterbse hatten.

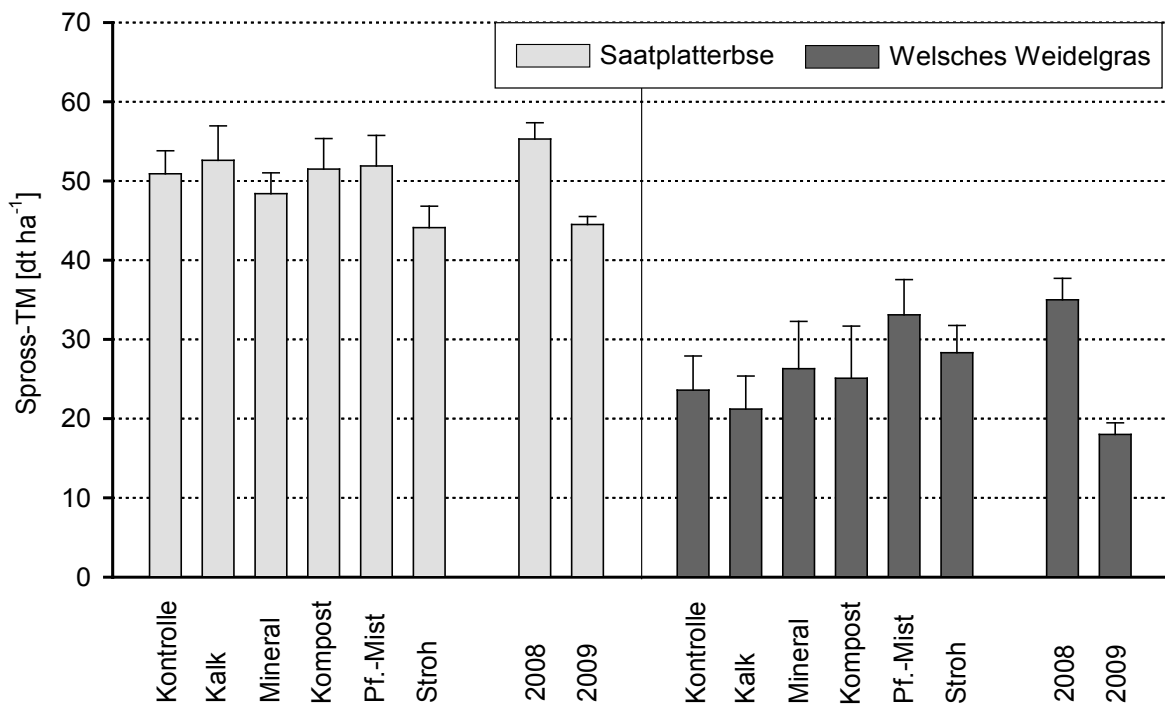


Abb. 4: Einfluss der Düngung auf den Sprossertrag der Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras in den Jahren 2008 und 2009; zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung \times Jahr vorhanden

Nach Düngung von Pferdemist wurde mit 33 dt ha^{-1} die höchste Spross-TM des Welschen Weidelgrases (nach Einzelauswertung der Jahre im Jahr 2009 signifikant gegenüber der Kontrolle) erzielt, was vor allem auf eine erhöhte N-Verfügbarkeit in dieser Variante zurückgeführt wird. Wie auch bei der Saatplatterbse lag die Spross-TM der Referenzfrucht Welsches Weidelgras im Jahr 2008 im Mittel der Prüfglieder mit $35 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ signifikant über dem Wert von 17 dt ha^{-1} im Jahr 2009 (Saatplatterbse: $55 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2008 gegenüber $45 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2009). Hinsichtlich der Spross-TM der Saatplatterbse zeigten sich im Mittel der Jahre keine Unterschiede aufgrund der Düngung zur Saat mit Ausnahme der Variante mit Strohdüngung, in welcher ein im Vergleich sehr geringer Feldaufgang festgestellt wurde.

In Abb. 5 ist die Spross-TM des Unkrautes in der Saatplatterbse in Abhängigkeit von der Düngung in den Jahren 2008 und 2009 dargestellt.

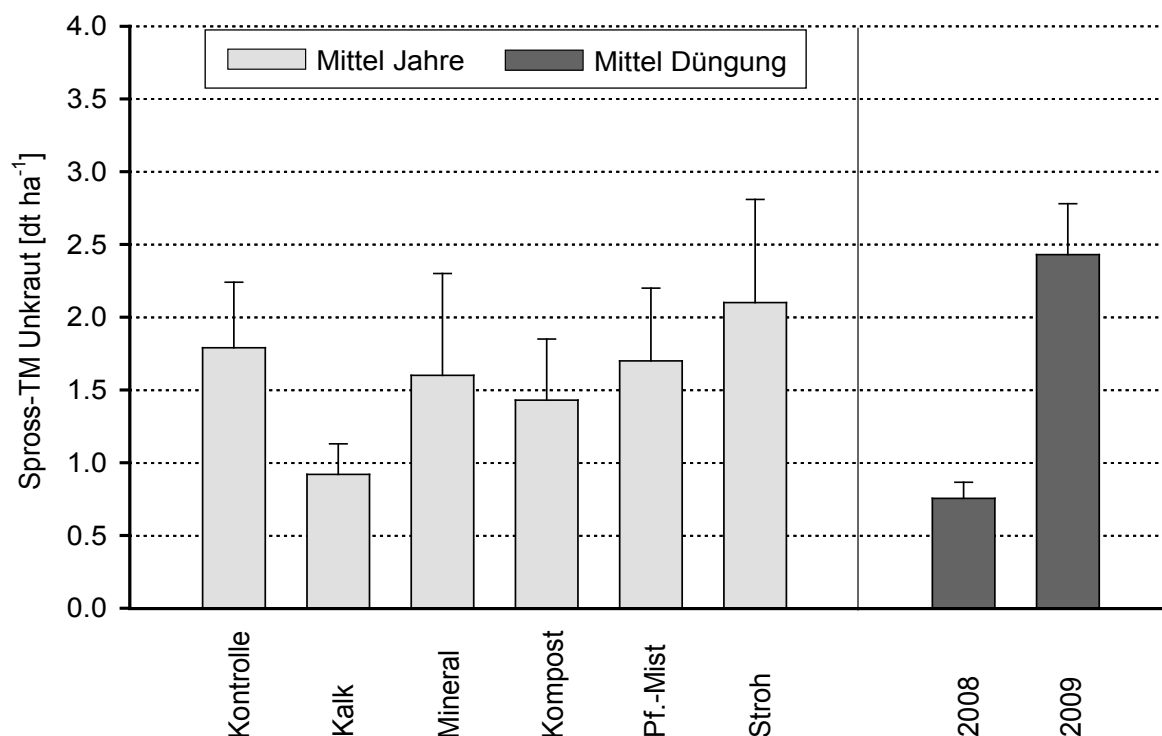


Abb. 5: Einfluss der Düngung auf die Unkraut-Sprossmasse in Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009; zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung × Jahr vorhanden

Die Spross-TM an Unkraut in der Saatplatterbse zum Zeitpunkt der Ernte lag im Mittel der Prüfglieder mit $0,8 \text{ dt TM ha}^{-1}$ im Jahr 2008 und mit $2,4 \text{ dt TM ha}^{-1}$ im Jahr 2009 (nicht signifikant) auf einem sehr niedrigen Niveau, wobei davon ausgegangen werden kann, dass die Höhe der Verunkrautung vor allem von der Höhe der Spross-TM der Saatplatterbse und der damit verbundenen Konkurrenz um Wachstumsfaktoren abhing. Der Vergleich der Verunkrautung zwischen den Prüfgliedern im Mittel der Jahre zeigte nur geringe Unterschiede.

3.1.2 N_{\min} -Vorrat im Boden

Die Ermittlung des N_{\min} -Vorrates im Boden jeweils nach der Ernte der Saatplatterbse und zur Ernte des Weizens sollte zeigen, ob und in welchem Umfang sich aufgrund der vergleichsweise hohen Mengen an Kohlenstoff und Stickstoff, welche mit den organischen Düngemitteln ausgebracht wurden, eine Veränderung des N_{\min} -Vorrates zu den genannten Zeitpunkten festzustellen ist. Im Jahr 2010 wurde eine zusätzliche Probennahme im Frühjahr zum Winterweizen durchgeführt (Abb. 6).

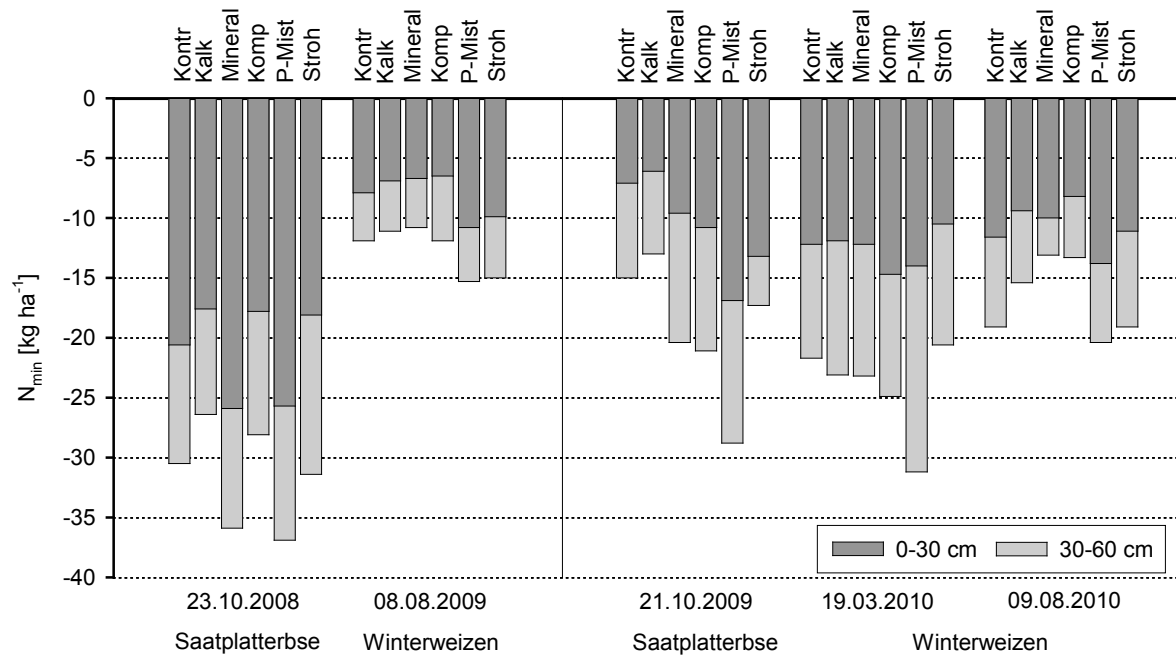


Abb. 6: Einfluss der Düngung auf den CaCl_2 -extrahierbaren N_{\min} -Vorrat im Boden nach Ernte der Saatplatterbse und nach Ernte des nachfolgenden Winterweizens in den Jahren 2008/2009 und 2009/2010

In den untersuchten Bodentiefen 0 bis 30 cm und 30 bis 60 cm unterschieden sich die Düngevarianten zu keinem Termin signifikant hinsichtlich des N_{\min} -Vorrates im Boden voneinander (siehe auch Tab. A 11). Tendenziell zeigten sich jedoch im Jahr 2009 nach der Saatplatterbse in einer Tiefe von 0 bis 30 cm bzw. im Jahr 2010 im Frühjahr unter Winterweizen in einer Tiefe von 30 bis 60 cm mit jeweils 17 kg ha^{-1} deutlich höhere Werte nach der Düngung von Pferdemist im Vergleich zur Kontrolle, was auf eine erhöhte Mineralisierung des organischen Stickstoffs aufgrund eines vergleichsweise engeren C/N-Verhältnisses von 36 des applizierten Pferdemistes schließen lässt. Zum Zeitpunkt der Ernte des Winterweizens konnten in beiden Versuchsjahren keine Unterschiede zwischen den N_{\min} -Vorräten im Boden aufgrund der vorangegangenen Düngung mehr festgestellt werden. Der im Mittel der Prüfglieder mit 32 kg ha^{-1} im Jahr 2008 gegenüber 19 kg ha^{-1} im Jahr 2009 in einer Tiefe von 0 bis 60 cm festgestellte höhere N_{\min} -Vorrat zum Zeitpunkt der Ernte der Saatplatterbse deutet auf eine höhere N-Mineralisierung im Boden im Jahr 2008 aufgrund des Witterungsverlaufes hin und entspricht dem höheren Sprossertrag der Saatplatterbse und des Welschen Weidelgrases, sowie der höheren N-Aufnahme aus dem Boden durch die Saatplatterbse in diesem Jahr (Kapitel 3.1.4).

Die Düngung von Pferdemist zur Saatplatterbse führte im Mittel zu allen Terminen der Probennahmen zum tendenziell höchsten N_{\min} -Vorrat im Boden in einer Tiefe von 0 bis 60 cm aller Prüfglieder. Im Jahr 2009 war dieser Effekt deutlich erkennbar. Zu keinem Termin der Probenahme wurden deutlich geringere N_{\min} -Vorräte im Boden aufgrund der Düngung zur Saatplatterbse im Vergleich zur Kontrolle festgestellt. Eine N-Immobilisierung nach Applikation und Einarbeitung einer Menge an Stroh-TM von 1 kg m^{-2} verbunden mit einem C/N-Verhältnis im Stroh von 100 konnte zum Zeitpunkt der Ernte der Saatplatterbse nicht festgestellt werden.

3.1.3 Nährstoffgehalt und Nährstoffentzug der Saatplatterbse

Die Ermittlung der Gehalte an P, K, S und Mo im Spross der Saatplatterbse zum Zeitpunkt der Ernte im Oktober und der Entzüge sollte zeigen, ob zusätzliche Nährstoffmengen im Boden aufgrund der Düngung im Verlauf der Vegetation in Abhängigkeit vom C/N-Verhältnis im ausgebrachten organischen Material für die Leguminosen verfügbar werden. Insbesondere sollte die Ausnutzung der in den Düngemitteln organisch gebundenen Nährstoffe (P, S) im Vergleich zu den in gelöster Form (K) vorkommenden Nährstoffen geprüft werden.

Im Mittel der Prüfglieder lagen die Gehalte und die Entzüge aller untersuchten Nährstoffe der Saatplatterbse - mit Ausnahme der Gehalte an P - im Jahr 2008 signifikant über den Werten des Jahres 2009. Insbesondere der Mikronährstoff Molybdän wies im Jahr 2009 um bis zu 66 % geringere Gehalte im Spross der Saatplatterbse gegenüber dem Vorjahr auf (Abb. 7, Tab. A 12 und Tab. A. 15). Das entspricht dem ermittelten Unterschied der Spross-TM der Saatplatterbse im Vergleich der Jahre (Kapitel 3.1.1), was einen etwaigen Verdünnungseffekt im Mittel der Prüfglieder (geringerer Nährstoffgehalt bei höherer Spross-TM) ausschließt und damit analog der Höhe der N_{\min} -Vorräte auf einen generell geringeren Stoffumsatz im Boden im Jahr 2009 hindeutet. Dagegen konnten - wie auch bei den N_{\min} -Vorräten - keine signifikanten Unterschiede in den Nährstoffgehalten und -entzügen bei der Saatplatterbse zwischen den Prüfgliedern im Jahr 2008 (mit Ausnahme der Gehalte an Schwefel) festgestellt werden. Im Jahr 2009 jedoch lagen die Gehalte an P, K und Mo im Spross der Saatplatterbse insbesondere nach Düngung von Pferdemist jeweils signifikant über den Werten der Kontrolle und gegenüber der Variante Mineral (P mit $3,0 \text{ g kg}^{-1}$ TM gegenüber $2,6 \text{ g}$ in der Kontrolle und $2,7 \text{ g}$ in der Variante Mineral, K mit $24,4 \text{ g kg}^{-1}$ TM gegenüber $16,6 \text{ g}$ in der Kontrolle und $18,0 \text{ g}$ in der

Variante Mineral und Mo mit $6,8 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ gegenüber $2,7 \text{ mg}$ in der Kontrolle und $3,5 \text{ mg}$ in der Variante Mineral).

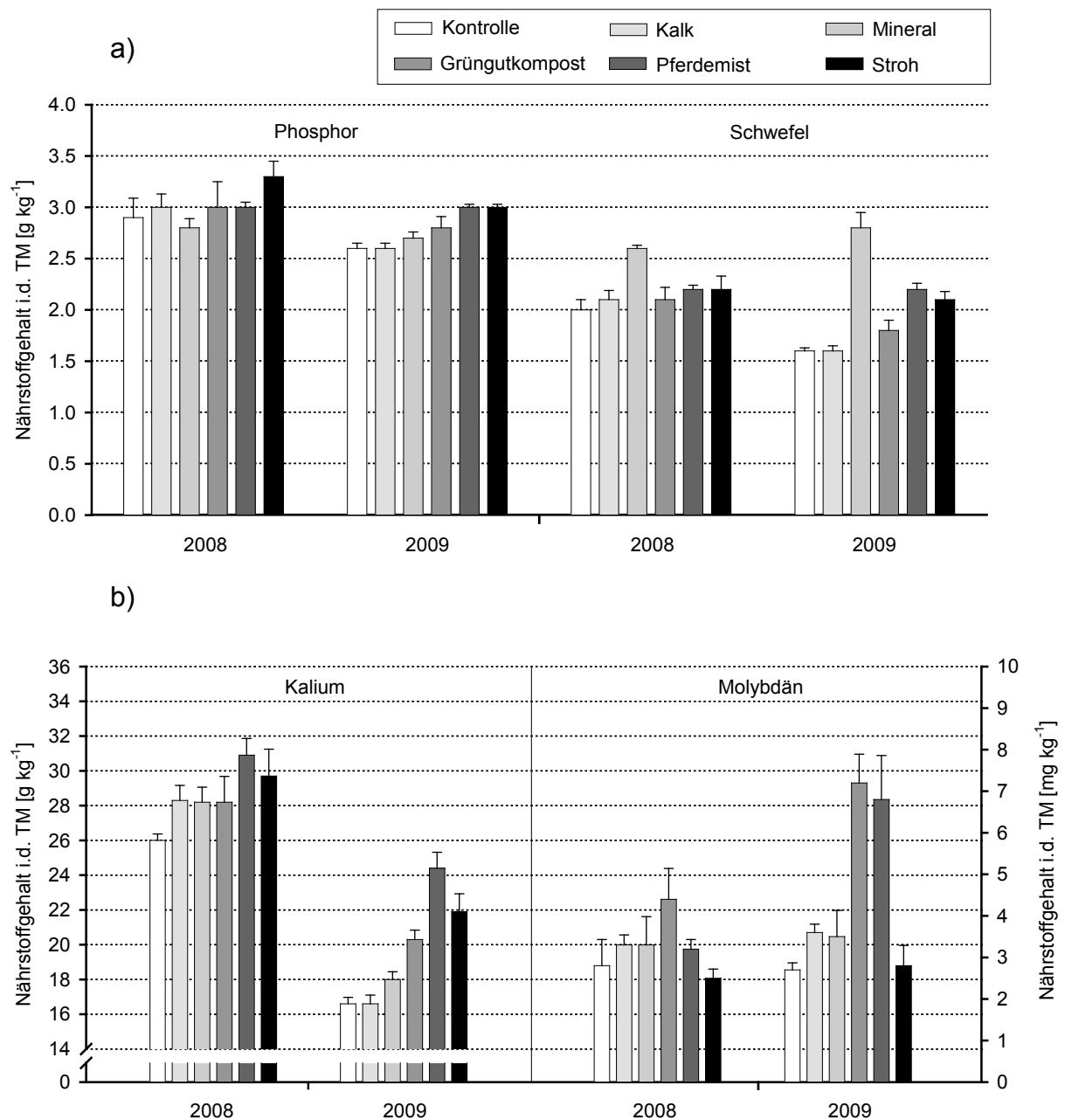


Abb. 7: Einfluss der Düngung auf den Gehalt an Phosphor, Schwefel (a) und an Kalium und Molybdän (b) im Spross der Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009

Auch nach der Düngung von Grüngutkompost zeigten sich im Jahr 2009 signifikant höhere Gehalte an K ($20,3 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) und Mo ($7,2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$) im Spross der Saatplatterbse gegenüber der Kontrolle. Das zeigt, dass bei witterungsbedingt geringerer Mineralisation im Boden die Düngung von Pferdemit und Grüngutkompost offenbar einen Vorteil hinsichtlich der Verfügbarkeit sowohl

organisch gebundener (P), als auch in mineralischer Form vorliegender Nährstoffe (K) im Ausgangsmaterial bietet. Abweichend davon lag der Gehalt an Schwefel im Spross der Saatplatterbse im Jahr 2008 in der Variante Mineral mit $2,6 \text{ g S kg}^{-1} \text{ TM}$ signifikant über dem Wert der Kontrolle und im Jahr 2009 mit $2,8 \text{ g S kg}^{-1} \text{ TM}$ auch deutlich über den Werten der Kontrolle und der Düngung organischer Düngemittel. Auch beim Entzug von Schwefel mit der geernteten Sprossmasse der Saatplatterbse wurden nach mineralischer Düngung in beiden Versuchsjahren jeweils die höchsten Werte festgestellt (Abb. 8).

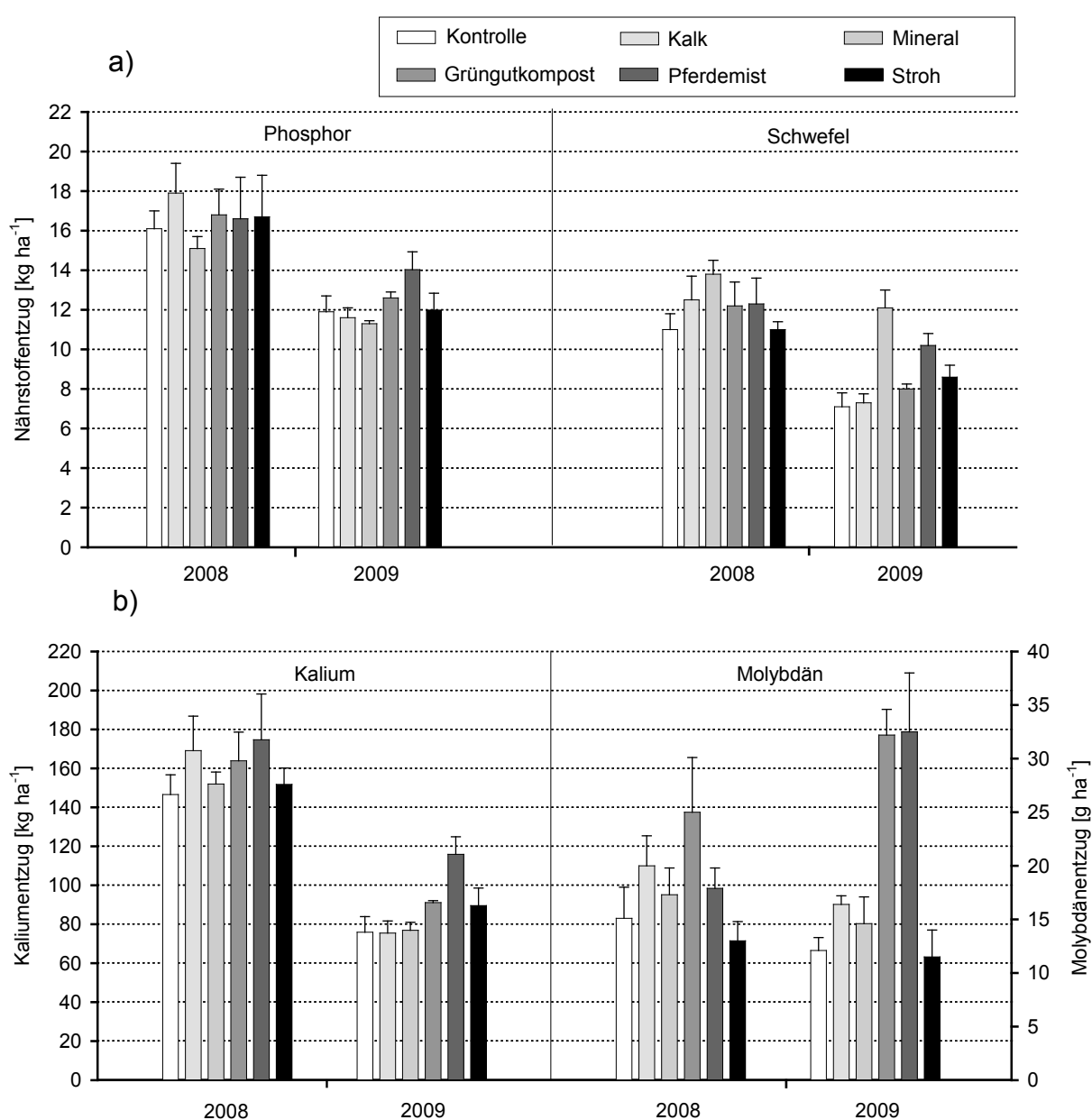


Abb. 8: Einfluss der Düngung auf den Entzug an Phosphor, Schwefel (a) und an Kalium und Molybdän (b) mit dem Spross der Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009

Im Jahr 2009 war dieser Effekt mit $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ gegenüber den anderen Prüfgliedern mit Ausnahme der Variante Pferdemist (10 kg ha^{-1}) signifikant. Dies lässt sich auf die leicht lösliche Form (K_2SO_4) und die hohe Menge ($100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$) des gedüngten Schwefels in der Variante Mineral gegenüber der Kontrolle und der organisch gedüngten Varianten zurückführen. Die jeweils deutlich erhöhten Gehalte und Entzüge an Mo im Spross der Saatplatterbse nach Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist, beides signifikant gegenüber der Kontrolle im Jahr 2009, und den anderen Düngevarianten weisen auf eine offensichtlich gute Verfügbarkeit dieses Nährstoffs für die Pflanzen im Verlauf der biologischen Umsetzung des organischen Materials im Boden hin. Bei den ebenfalls ermittelten Nährstoffen Magnesium und Bor wurden bei Saatplatterbse mit einer Ausnahme in keinem der beiden Versuchsjahre Unterschiede der Gehalte und Entzüge im Vergleich der Prüfglieder festgestellt. Die Ergebnisse hierzu sind in Tab. A 15 im Anhang angegeben.

Anhand der ermittelten Nährstoffgehalte und -entzüge kann davon ausgegangen, dass die gedüngten Einzelnährstoffe aus den organischen und mineralischen Düngemitteln kurzfristig prinzipiell pflanzenverfügbar wurden. Die absolut entzogenen Nährstoffmengen in den gedüngten Varianten waren jedoch bei der Saatplatterbse vergleichsweise gering. Dementsprechend niedrig fiel auch die Ausnutzung der gedüngten Nährstoffmengen durch die Saatplatterbse aus (Tab. 9).

Tab. 9: Scheinbare Nährstoffausnutzung (in Prozent der gedüngten Nährstoffmenge) durch Saatplatterbse nach mineralischer und organischer Düngung in den Jahren 2008 und 2009*

Düngevarianten	Scheinbare Nährstoffausnutzung [%]		
	Phosphor	Kalium	Schwefel
Mineral	-1,0	1,4	3,8
Grüngutkompost	0,7	3,5	1,4
Pferdemist	3,1	5,6	3,4
Stroh	1,6	9,1	5,2
<i>P</i> -Wert Düngung	0,2999	0,7710	0,9759

*Mittelwerte der Jahre 2008 und 2009, zweifaktorieller F-Test, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung × Jahr vorhanden

So wurden in Abhängigkeit von der ausgebrachten Menge in den Düngevarianten nur 0 bis 3,1 % Phosphor, 1,4 bis 9,1 % des gedüngten Kaliums und 1,4 bis 5,2 % des gedüngten Schwefels aufgenommen. Dies lässt sich zumindest bei P hauptsächlich auf die hohen Nährstoffgehalte im Boden (S. 9, Tab. 2) sowie einen geringen Bedarf zurückführen (LFL 2008) und erlaubt Rückschlüsse auf einen nährstoffbedingten Mehrertrag an Sprossmasse der Saatplatterbse. Bei negativer Nährstoffausnutzung lag die Nährstoffaufnahme in der Kontrolle über dem Wert der gedüngten Variante. Es wurden zudem keine signifikanten Unterschiede der Nährstoffausnutzung zwischen den Düngevarianten ermittelt.

3.1.4 N-Aufnahme der Saatplatterbse und der Referenzfrucht

Die Ermittlung der Aufnahme von Stickstoff durch die Saatplatterbse hatte zum Ziel, festzustellen, in welchem Umfang die mit den organischen Düngemitteln in den Boden eingebrachten N-Mengen einen Einfluss auf die N-Aufnahme aus dem Boden und die symbiotische N₂-Fixierung haben.

Während der Ertrag an Sprossmasse der Saatplatterbse im Mittel der Prüfglieder im Jahr 2009 um 20 % gegenüber dem Vorjahr abnahm, verminderte sich die Menge an aufgenommenem Stickstoff signifikant um 35 %. Dies resultierte gegenüber dem Vorjahr sowohl aus einer verminderten Aufnahme an Stickstoff durch die Pflanzen aus dem Boden (-45 %), als auch aus einer geringeren symbiotischen N₂-Fixierung (-25 %, Abb. 9). Der Vergleich der Prüfglieder zeigt, dass die Düngung mit Pferdemist im Mittel der Jahre bei der Saatplatterbse zu einer um 44 % höheren N-Aufnahme aus dem Boden im Vergleich zur Kontrolle führte (nicht signifikant). Das lässt sich auf die ermittelten Werte im Jahr 2009 zurückführen (N-Aufnahme aus dem Boden 60 kg ha⁻¹ nach Düngung von Pferdemist gegenüber 29 kg ha⁻¹ in der Kontrolle), in dem diese Unterschiede gegenüber dem Jahr 2008 statistisch gesichert deutlich wurden (Tab. A 19). Dieses Ergebnis, verbunden mit dem im Jahr 2009 ermittelten höheren N_{min}-Vorrat im Boden nach Düngung von Pferdemist zum Zeitpunkt der Ernte gegenüber der Kontrolle (Kapitel 3.1.2) weist darauf hin, dass in dieser Variante offenbar mehr pflanzenverfügbarer Stickstoff im Boden vorhanden war und von der Saatplatterbse genutzt wurde.

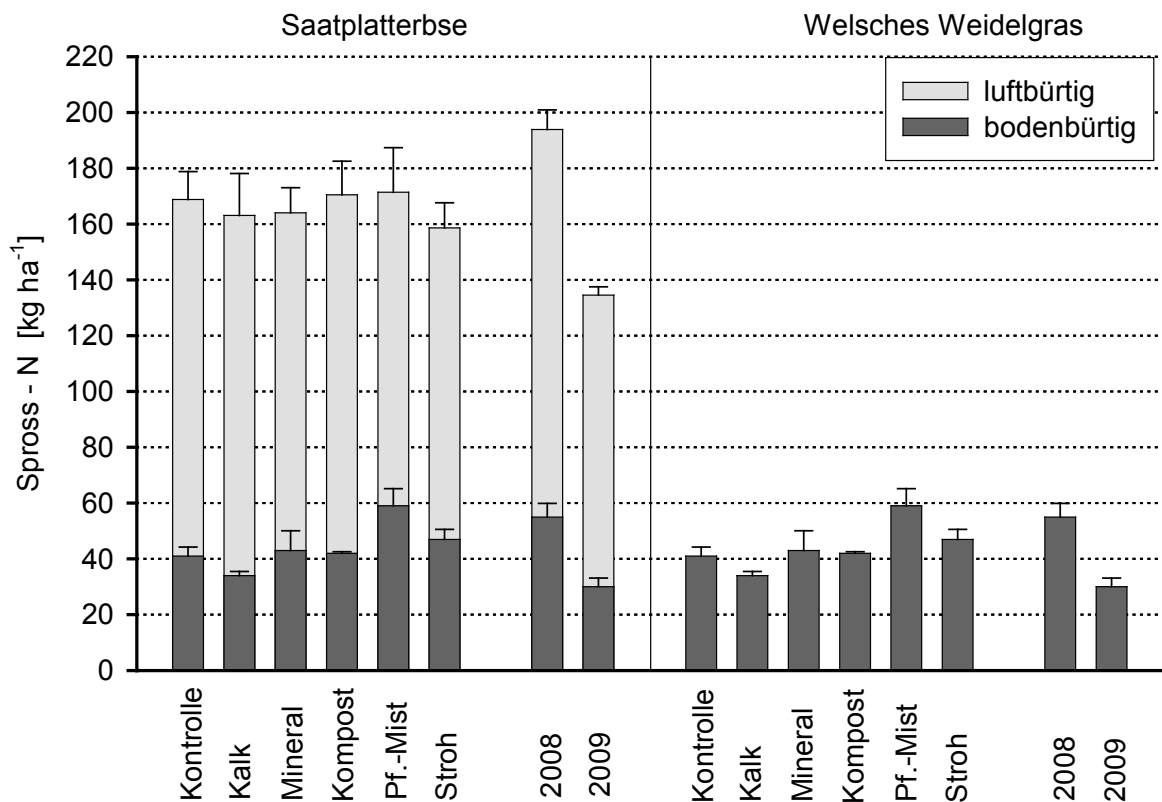


Abb. 9: Einfluss der Düngung auf die Aufnahme an Stickstoff aus dem Boden und die symbiotische N₂-Fixierung der Saatplatterbse und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras in den Jahren 2008 und 2009, zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung × Jahr vorhanden

Daraus resultierend lag die symbiotische N₂-Fixierung nach der Düngung von Pferdemist mit 10 kg ha⁻¹ N etwa 9 % unter dem Wert der Kontrolle. Auch der Anteil an luftbürtigem Stickstoff am Spross-N der Saatplatterbse lag mit 63 % unter dem Wert der anderen Prüfglieder (nicht signifikant, Tab. 10). Damit wurde bei der Saatplatterbse, wie auch bei der Referenzfrucht, im Mittel von zwei Jahren eine tendenziell höhere N-Aufnahme aus dem Boden nach der Düngung von Pferdemist festgestellt, welche offenbar aus der Mineralisierung des organisch gebundenen Dünger-N stammt und zu einer Reduzierung der symbiotischen N₂-Fixierung führte.

Tab. 10: Einfluss der Düngung auf den Anteil an boden- (N_{dfs}) und luftbürtigem (N_{dfa}) Stickstoff am Gesamtstickstoff im Spross der Saatplatterbse, Mittelwerte der Jahre 2008 und 2009

Prüfglieder	N_{dfs} [%]*	N_{dfa} [%]*
Kontrolle	22,2 a	77,8 a
Kalk	23,8 a	76,2 a
Mineraldüngemittel	24,8 a	75,2 a
Grüngutkompost	22,9 a	77,1 a
Pferdemist	34,3 a	65,7 a
Stroh	28,6 a	71,4 a
Mittelwert	26,1	73,9

* gewichtete Mittelwerte der Varianten,
Tukey-Test, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Jahr

Der Spross-N in der Saatplatterbse nach Düngung von Stroh lag im Mittel der Jahre um 13 kg ha^{-1} etwas unter dem Wert der Kontrolle, was sich mit der geringeren Spross-TM der Saatplatterbse erklären lässt. Ein höherer Anteil an luftbürtigem Stickstoff am Spross- N aufgrund einer zeitweiligen N-Festlegung im Boden nach der Ausbringung des Strohs ließ sich nicht erkennen.

3.1.5 Bodenatmung in Saatplatterbse

Das Ziel der Messung der Bodenatmung bestand darin, den Grad der biologischen Aktivität im Boden im Verlauf der Vegetationszeit der Kulturen und qualitativ die Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Boden in Abhängigkeit von der Düngung abzuschätzen. In der Saatplatterbse wurden ausschließlich im Jahr 2008 Messungen durchgeführt. Im Mittel über sieben Messtage wurde im Jahr 2008 in den Varianten mit Düngung von Pferdemist und Stroh eine signifikant höhere Bodenatmung gegenüber der Kontrolle ohne Düngung und den anderen Vergleichsvarianten festgestellt (Tab. 11). Die Höhe der Bodenrespiration lag in der Kontrolle ohne Düngung an sieben Messtagen im Bereich zwischen 423 und $814 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$. Im Vergleich dazu wurden in der Variante mit der Düngung von Pferdemist deutlich höhere Werte zwischen 711 und $1356 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ und in der Variante mit Strohdüngung zwischen 678 und $1392 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ festgestellt (Tab. A 8).

Tab. 11: Vergleich der Mittelwerte der Bodenatmung in Saatplatterbse nach organischer und mineralischer Düngung im Jahr 2008

Prüfglieder	Mittlere Bodenatmung an 7 Terminen 2008 * [mg m ⁻² h ⁻¹ CO ₂]
Kontrolle	575 ±30 b
Kalk	622 ±49 b
Mineraldüngemittel	600 ±44 b
Grüngutkompost	652 ±56 b
Pferdemist	984 ±78 a
Stroh	981 ±74 a

* zweifaktorielle Auswertung, Tukey-Test, $\alpha < 0,05$; Daten transformiert,
keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung × Termin

Die ermittelten Werte der Bodenatmung zeigen, dass die Düngung von Pferdemist und Stroh unmittelbaren Einfluss auf die biologische Aktivität im Boden und die damit verbundene Freisetzung von Kohlenstoff in Form von CO₂ hat. Da die Messpunkte über den gesamten Vegetationszeitraum der Erbse bewuchsfrei gehalten wurden, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss von Pflanzenwurzeln auf die gemessene Bodenatmung deutlich begrenzt war. Die Höhe der Messwerte haben aufgrund der geringen Anzahl und des zeitlichen Abstandes der Termine nur einen qualitativen Aussagewert, lassen jedoch aufgrund ihrer Verteilung über den gesamten Vegetationszeitraum die Schlussfolgerung zu, dass unabhängig vom C/N-Verhältnis des eingebrachten organischen Materials (Pferdemist 24 und Stroh 95) intensive Abbau- und Mineralisierungsprozesse im Boden erfolgten.

3.1.6 ¹³C-Isotopensignatur im Spross der Saatplatterbse

Die Bestimmung der natürlich vorkommenden Isotopenverhältnisse des Kohlenstoffes (¹³C/¹²C) in den organischen Düngemitteln und in der Spross-TM der Leguminosen sollte dazu dienen, den Anteil an Kohlenstoff zu schätzen, welcher aus den Düngemitteln stammend im Spross der Leguminosen zum Zeitpunkt der Ernte vorlag. Daher wurden die Isotopenverhältnisse nur in den organischen Düngemitteln und im Spross der Saatplatterbse der organisch gedüngten Varianten und der Kontrolle ohne Düngung bestimmt.

Im Jahr 2008 lagen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (^{13}C natural abundance) der eingesetzten organischen Düngemittel jeweils leicht höher gegenüber den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten im Spross der Saatplatterbse (Tab. 12).

Tab. 12: $\delta^{13}\text{C}$ -Wert (natural abundance) in den ausgebrachten organischen Düngemitteln und im Spross der Saatplatterbse nach organischer Düngung in den Jahren 2008 und 2009

Prüfglieder	$\delta^{13}\text{C}$ -Wert [‰]			
	2008		2009	
	Düngemittel	Spross Saatplatterbse	Düngemittel	Spross Saatplatterbse
Kontrolle	-	-30,04 \pm 0,2 ab	-	-27,53 \pm 0,2 ab
Grüngutkompost	-27,82	-29,72 \pm 0,1 a	-28,08	-27,48 \pm 0,1 a
Pferdemist	-27,27	-30,10 \pm 0,2 ab	-28,48	-28,49 \pm 0,1 bc
Stroh	-29,00	-30,42 \pm 0,1 b	-28,71	-28,65 \pm 0,4 c

Tukey-Test, $\alpha < 0,05$

Demgegenüber wurden im Jahr 2009 niedrigere (Grüngutkompost) bzw. gleich hohe (Pferdemist und Stroh) $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in den organischen Düngemitteln im Vergleich zu den Werten im Spross der Saatplatterbse festgestellt. Es konnten signifikant unterschiedliche Delta-Werte der natürlichen ^{13}C -Anreicherung im Spross der Saatplatterbse zwischen einzelnen Düngevarianten festgestellt werden.

Die Voraussetzung, um auf der Grundlage der natürlichen Anreicherung an ^{13}C -Isotopen in den organischen Düngemitteln und unter Verwendung von Formel 9 eine Schätzung des dünggebürtigen Kohlenstoffs im Spross der Saatplatterbse durchzuführen, ist jedoch ein ausreichend hoher Grad der ^{13}C -Anreicherung der gedüngten organischen Düngemittel gegenüber dem Spross der Leguminose und ein höherer Grad der ^{13}C -Anreicherung im Spross der Saatplatterbse in den gedüngten Varianten gegenüber der Kontrolle.

3.1.7 Ertrag und N-Aufnahme der Nachfrucht Winterweizen

Von Interesse war es, in welchem Maße sich bei dem nach der Saatplatterbse folgenden Winterweizen Effekte hinsichtlich des Kornertrages und der N-Aufnahme in Abhängigkeit von der Düngung der Vorfrucht zeigen. Der Kornertrag des

Winterweizens lag im Mittel der Prüfglieder im Jahr 2009 und 2010 bei jeweils 18 dt ha^{-1} TM (Abb. 10).

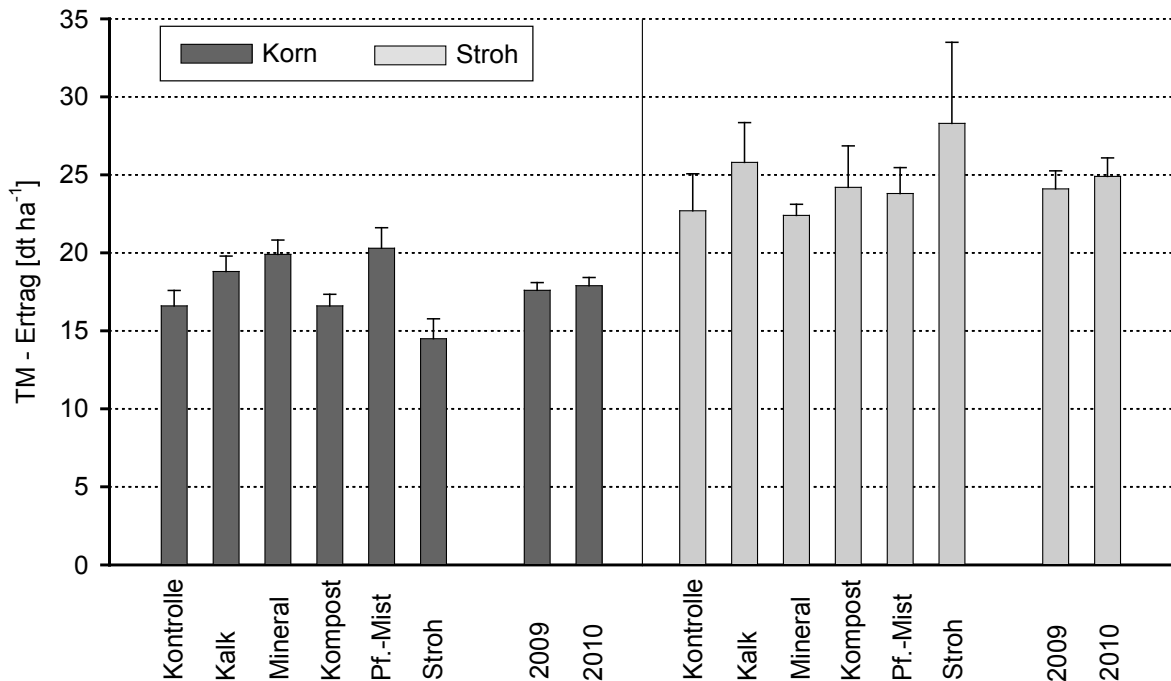


Abb. 10: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf den Korn- und Strohertrag der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010; zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung \times Jahr vorhanden

Signifikant unterschied sich der Kornertrag des Weizens im Mittel der Jahre zwischen den Varianten mit Einsatz von Pferdemist und Mineraldüngemittel zur Vorfrucht Saatplatterbse (jeweils 20 dt ha^{-1}) und der Variante mit Strohdüngung (15 dt ha^{-1}). Der Strohertrag lag im Mittel der Düngevarianten bei 24 dt ha^{-1} im Jahr 2009 bzw. bei 25 dt ha^{-1} im Jahr 2010. Zwischen den Düngevarianten einschließlich der Kontrolle ohne Düngung zeigten sich im Mittel der Jahre keine signifikanten Unterschiede im Strohertrag. Der festgestellte geringere Kornertrag des Weizens nach der Düngung von Stroh zur Vorfrucht und der etwas höhere Strohertrag ergaben einen deutlich niedrigeren Ernteindex in dieser Variante (Tab. 13). Dieser war in der Variante mit Strohdüngung mit 36 % im Mittel der Jahre vergleichsweise niedrig (nicht signifikant verschieden). Zum einen könnte nach der Strohdüngung zur Saatplatterbse aufgrund der hohen Applikationsmenge ein Teil des Stroh nicht oder nur unvollständig biologisch abgebaut worden sein und zum Weizen aufgrund eines erhöhten N-Bedarfs im Boden (mikrobieller Abbau des verbliebenen Stroh vs. N-Bedarf des

Weizens) ungünstig gewirkt haben. Die N_{\min} -Vorräte zum Zeitpunkt der Frühjahrsbeprobung des Weizens im Jahr 2010 (Abb. 6 in Kapitel 3.1.2) deuten darauf hin. Zudem ist es möglich, dass durch den im Vergleich geringeren Spross-N der Saatplatterbse in dieser Variante ein geringeres N-Angebot im Boden unter dem Weizen gegenüber der Variante mit Düngung von Pferdemist vorhanden war.

Tab. 13: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf den Ernteindex der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010

Düngung	Ernteindex [%]	Jahr	Ernteindex [%]	
Kontrolle	42,9 ±2,4	2009	42,9 ±1,5	
Kalk	42,9 ±2,4	2010	42,6 ±1,4	
Mineral	47,0 ±0,6			
Grüngutkompost	41,4 ±2,1			
Pferdemist	46,0 ±0,6			
Stroh	36,1 ±3,6			
<i>P</i> -Wert Düngung	0,1134			
<i>P</i> -Wert Jahr	0,9284			

zweifaktorieller F-Test, keine signifikante Wechselwirkung Düngung × Jahr vorhanden

Die Aufnahme an Stickstoff aus dem Boden durch den Winterweizen nach Vorfrucht Saatplatterbse lag im Mittel der Jahre 2009 und 2010 bei $41 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, wobei $31 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ mit dem Korn und $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ mit dem Stroh entzogen wurden. Während im Mittel der Jahre keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngevarianten einschließlich der Kontrolle hinsichtlich des N-Entzuges über das Stroh des Weizens ermittelt wurden, zeigten sich signifikante Unterschiede beim N-Entzug über das Korn und damit auch im Vergleich der Gesamt-N-Aufnahme des Weizens (Korn und Stroh, Abb. 11).

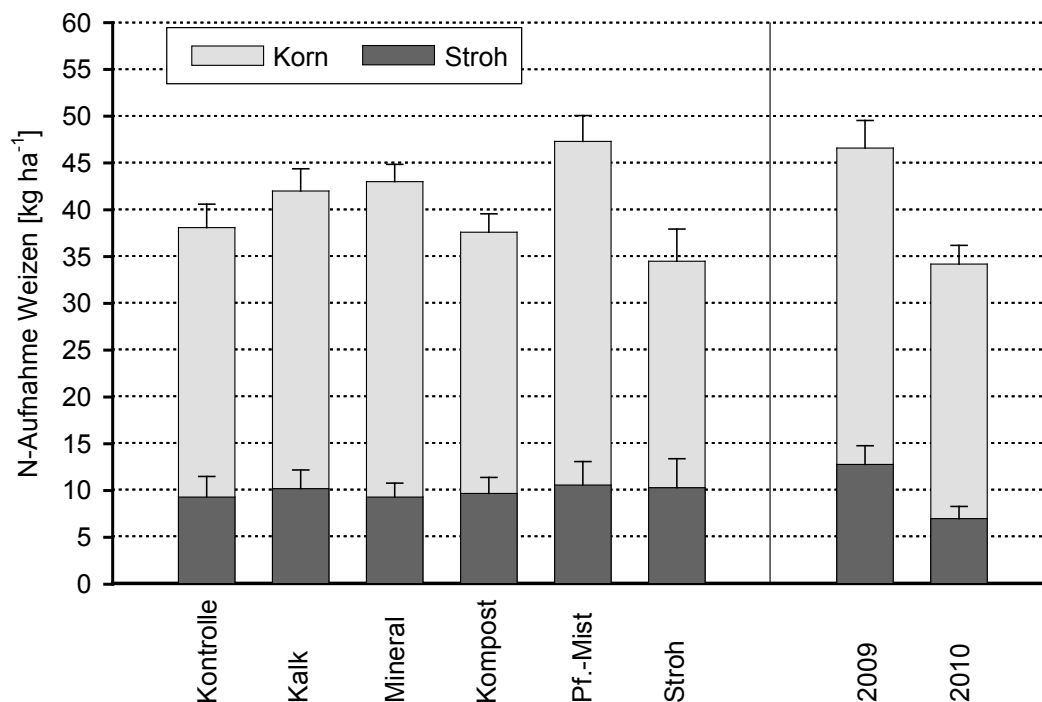


Abb. 11: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf die Aufnahme an Stickstoff der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010; zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung \times Jahr vorhanden

In der Variante mit der Düngung von Pferdemist zur Vorfrucht wurde mit 47 kg ha^{-1} signifikant mehr Stickstoff gegenüber den Varianten mit der Düngung von Stroh (35 kg ha^{-1}) sowie Grüngutkompost und der Kontrolle (jeweils 38 kg ha^{-1}) aufgenommen. Analog der Aufnahme von bodenbürtigem Stickstoff durch die Saatplatterbse in den beiden Versuchsjahren 2008 und 2009 erfolgte auch durch den jeweils folgenden Weizen nach Düngung von Pferdemist zur Saatplatterbse die höchste N-Aufnahme des Weizens aller Prüfglieder und entspricht damit den Ergebnissen des Kornertrages.

Auch die Ergebnisse des Rohproteingehaltes im Korn des Weizens nach Saatplatterbse bestätigen eine gegenüber der Kontrolle verbesserte N-Verfügbarkeit und -aufnahme nach der Düngung von Pferdemist (Abb. 12, Tab. A 18).

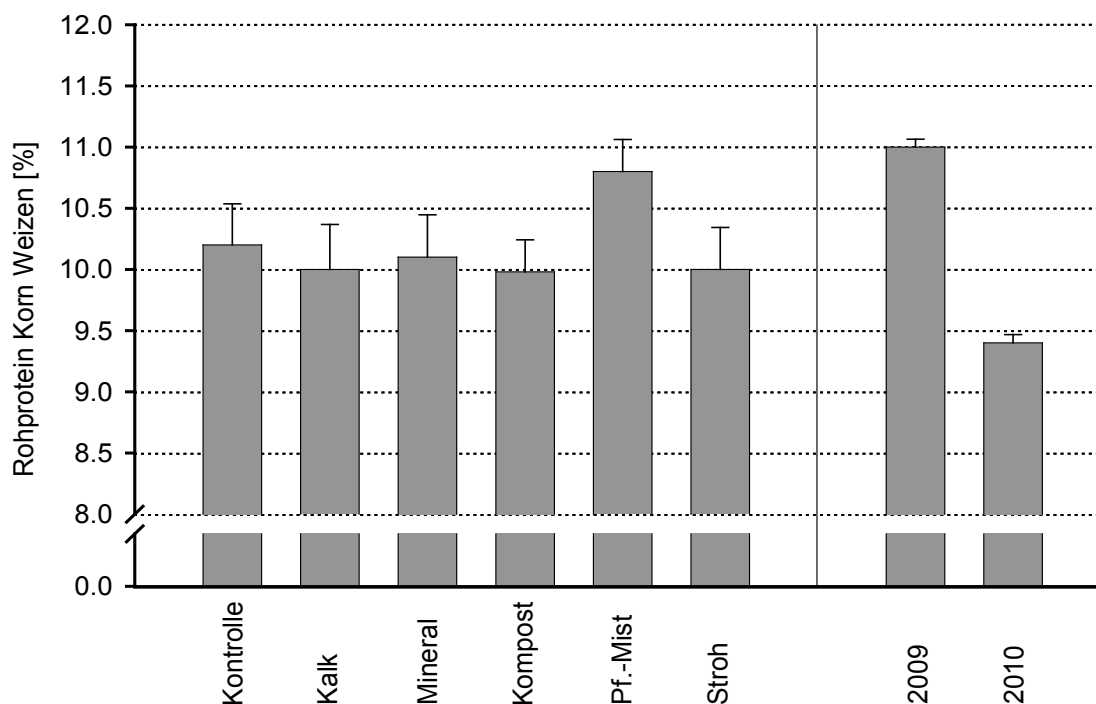


Abb. 12: Einfluss der Düngung zur Saatplatterbse auf den Rohproteingehalt im Korn der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2009 und 2010; zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung × Jahr

Der Rohproteingehalt im Korn des Weizens lag im Mittel der Jahre in der Variante Pferdemist bei gleichem bzw. teils höherem Kornertrag bei 10,7 % gegenüber der Kontrolle mit 10,1 % (nicht signifikant verschieden) und zeigte in der Einzelauswertung der Jahre insbesondere im Jahr 2010 signifikante Unterschiede gegenüber den anderen Prüfgliedern (Tab. A 18).

3.2 Ackerbohne, Rotklee und Nachfrucht Winterweizen 2009 bis 2011

Die Ergebnisse zur Ackerbohne und zum Rotklee umfassen analog zur Saatplatterbse die Spross-TM der Leguminosen und der Referenzkulturen Spitzwegerich und Welsches Weidelgras, sowie die N_{\min} -Mengen im Boden zu vier Terminen. Dargestellt werden die Gehalte der Makronährstoffe Phosphor, Kalium, Schwefel und des Spurennährstoffes Molybdän im Blatt der Ackerbohne und im Spross des Rotklees sowie bei Rotklee die aufgenommenen Mengen der genannten Nährstoffe. Dem folgen die Ergebnisse zur Bodenatmung und zur Quantifizierung der Aufnahme von Kohlenstoff aus den organischen Düngemitteln. Weiterhin werden die

Ergebnisse zur boden- und luftbürtigen N-Aufnahme der Leguminosen und die Spross-TM und N-Aufnahme der Folgefrucht Winterweizen dargestellt.

3.2.1 Ertrag der Ackerbohne und Referenzfrucht Spitzwegerich

Der Feldaufgang der Ackerbohne lag im Jahr 2009 im Mittel der Prüfglieder bei 70 %, im Jahr 2010 bei 77 % (Tab. 14).

Tab. 14: Einfluss der Düngung auf den Feldaufgang der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010

Feldaufgang Ackerbohne [%]							P-Wert Düngung*
Jahr	Prüfglieder						
	Kontrolle	Kalk	Mineral	Kompost	Pf.-Mist	Häcksel	
2009	79,3	69,5	72,5	69,5	54,3	76,0	0,1180
2010	82,7	74,6	72,4	70,7	82,7	81,4	0,6429

* einfaktorieller F-Test

Ähnlich wie bei der Saatplatterbse in den Varianten Stroh und Pferdemist war auch bei der Ackerbohne in der Variante mit Düngung von Pferdemist im Jahr 2009 ein deutlich verminderter, allerdings nicht signifikant verschiedener Feldaufgang gegenüber den Vergleichsvarianten zu verzeichnen. Als Ursache kommt auch bei der Ackerbohne vor allem eine ungünstige Wasserversorgung aufgrund der hohen Menge an grobstrukturiertem organischen Material im Ablagebereich der Samen, verbunden mit einer sehr geringen Höhe der Niederschläge von 11 mm im Jahr 2009 im Zeitraum von 30 Tagen nach der Saat infrage. Im Jahr 2010 betrug die Höhe der Niederschläge im gleichen Zeitraum 42 mm und der Feldaufgang lag bei 83 % in dieser Düngevariante.

Der Kornertrag der Ackerbohne lag im Jahr 2009 im Mittel der Prüfglieder mit 36 dt ha⁻¹ TM 22 % über dem Ertrag der Ackerbohne des Jahres 2010 mit 28 dt ha⁻¹ TM (Abb. 13). Im Jahr 2009 unterschieden sich der Kornertrag in der Variante Pferdemist mit 30 dt ha⁻¹ TM entsprechend dem geringen Feldaufgang und der Kornertrag der Variante Gehölzhäcksel mit 43 dt TM ha⁻¹ signifikant voneinander. Im Jahr 2010 wurden keine signifikanten Unterschiede im Kornertrag der Ackerbohne zwischen den Prüfgliedern festgestellt. Bei der zweifaktoriellen Varianzanalyse des Kornertrages wurden signifikante Wechselwirkungen zwischen Düngung und Jahr

ermittelt (vergl. auch Tab. A 36). Begründen lässt sich dies mit der signifikant hohen Ertragsdifferenz im Jahr 2009 zwischen den Varianten Pferdemist und Gehölzhäcksel und dem sehr geringen Unterschied des Kornertrages in diesen Varianten im Jahr 2010.

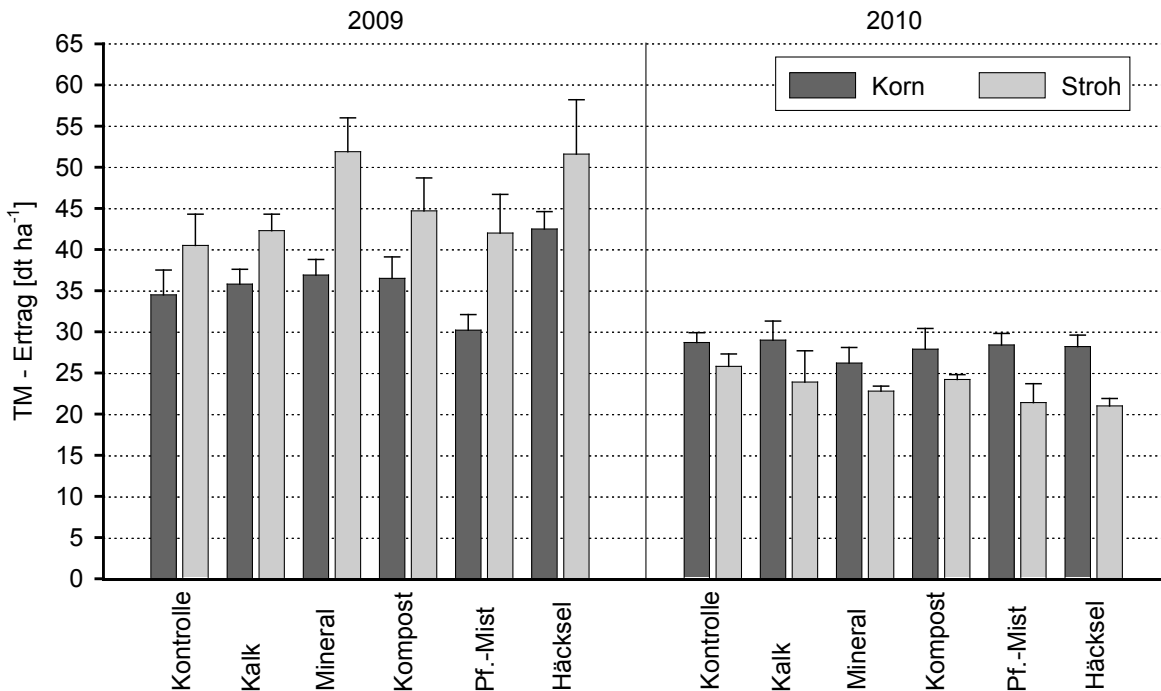


Abb. 13: Einfluss der Düngung auf den Korn- und Strohertrag der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010

Der Strohertrag der Ackerbohne (Stängel und Blattmasse) lag im Mittel der Prüfglieder bei $45 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2009 und bei $23 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2010 (signifikant). Im Vergleich der Prüfglieder zeigten sich in beiden Versuchsjahren keine signifikanten Unterschiede (siehe auch Tab. A 36). Der Anteil der ermittelten Blatt-TM am Stroh betrug im Mittel der Jahre 25 %.

Während hinsichtlich der Korn- und Stroh-TM der Ackerbohne - mit Ausnahme in der Variante Pferdemist im Jahr 2009 - keine Effekte in Abhängigkeit der Düngung zur Saat ermittelt wurden, zeigten sich bei der Verunkrautung zum Zeitpunkt der Ernte der Ackerbohne im Mittel der Jahre 2009 und 2010 deutliche Unterschiede zwischen den Prüfgliedern mit organischer Düngung (Abb. 14). Die Spross-TM des Unkrautes lag im Mittel der Varianten Kalk, Mineraldüngemittel, Grüngutkompost und der Kontrolle ohne Regulierungsmaßnahmen im Vegetationszeitraum bei 20 dt ha^{-1} . In der Variante Pferdemist zeigte sich ein um 73 % signifikant erhöhtes Unkraut-aufkommen mit einer Sprossmasse von $37 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ gegenüber $10 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$ in der

Variante Gehölzhäcksel. Gegenüber der Kontrolle betrug die erhöhte Verunkrautung nach Düngung von Pferdemist noch 49 % (nicht signifikant verschieden). Das lässt sich vor allem mit einer offensichtlich erhöhten N-Verfügbarkeit im Boden nach Düngung von Pferdemist begründen, welche ein stärkeres Unkrautwachstum in dieser Variante begünstigte.

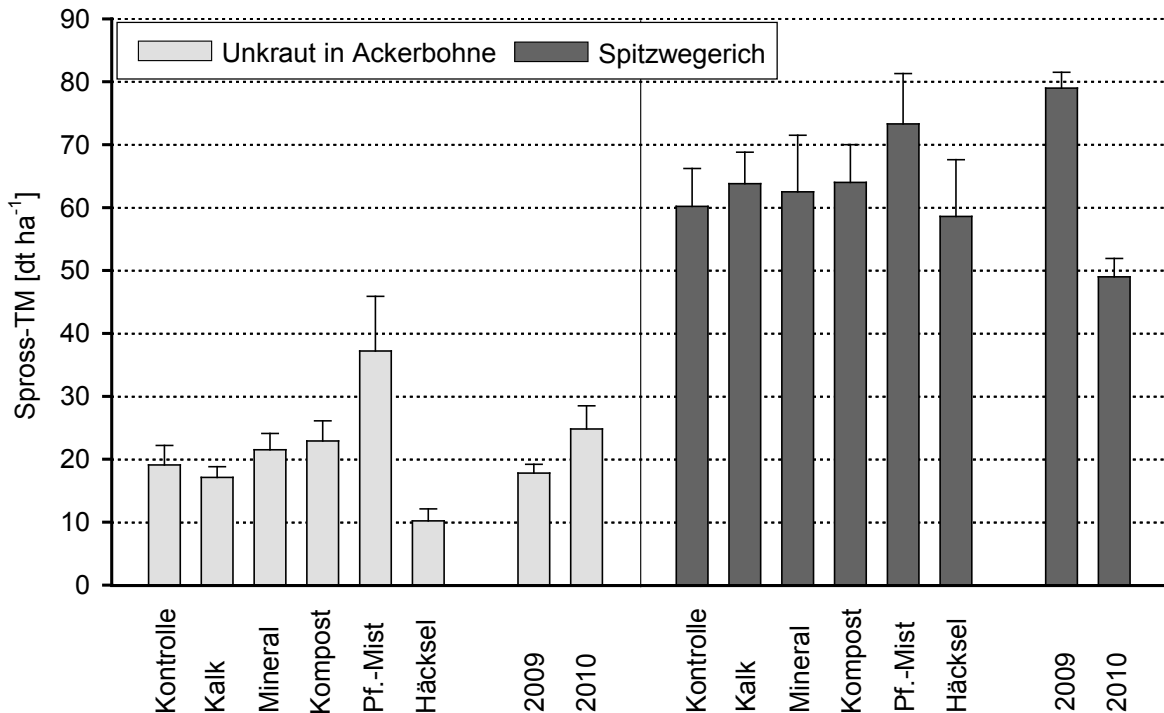


Abb. 14: Einfluss der Düngung auf die Spross-TM der Unkräuter in Ackerbohne und von Spitzwegerich in den Jahren 2009 und 2010; zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung × Jahr vorhanden

Eine gute N-Verfügbarkeit wird vor allem auf die mit 73 dt ha⁻¹ TM um 18 % höhere Spross-TM der Referenzkultur Spitzwegerich nach Düngung von Pferdemist gegenüber der Kontrolle mit 60 dt ha⁻¹ (Abb. 14) und einer damit verbundenen N-Aufnahme von 99 kg ha⁻¹ (Variante Pferdemist) bzw. 74 kg ha⁻¹ (Kontrolle) im Mittel der Jahre zurückgeführt (Tab. A 39). Die in beiden Jahren etwas geringere (-20 %) Bestandesdichte der Ackerbohne (Stängel je m²) in der Variante Pferdemist gegenüber der Kontrolle dürfte nur einen geringen Einfluss auf die Verunkrautung gehabt haben, da die Bestandesdichte auch nach Düngung von Gehölzhäcksel im Vergleich zur Kontrolle zwar etwas geringer ausfiel (-11 %), die Verunkrautung jedoch um 48 % reduziert wurde (Abb. 14, Tab. A 35).

Die deutliche Verringerung der Verunkrautung nach Düngung von Gehölzhäcksel ist wahrscheinlich auf einen hohen Anteil an Nadelgehölz im Düngemittel zurückzuführen. Der biologische Abbau des organischen Materials im Boden bewirkte offenbar die Freisetzung von keim- bzw. wuchshemmenden organischen Verbindungen, was zusammen mit einer hohen Applikationsmenge von 2,2 bzw. 2,5 kg m⁻² Frischmasse und einer flachen Einarbeitung des Gehölzhäcksel zum beschriebenen Effekt führte.

3.2.2 Ertrag des Rotklees und der Referenzfrucht Welsches Weidelgras

Der Feldaufgang des Rotklees betrug im Mittel der Prüfglieder 73 % im Jahr 2009 und 66 % im Jahr 2010. Wie bei der Saatplatterbse und bei der Ackerbohne im Jahr 2009, wurde 2010 auch bei Rotklee ein mit 46 % deutlich verminderter Feldaufgang (nicht signifikant) in der Variante Pferdemit gegenüber den Vergleichsvarianten festgestellt (Tab. 15).

Tab. 15: Einfluss der Düngung auf den Feldaufgang des Rotklees in den Jahren 2009 und 2010

Feldaufgang Rotklee [%]							P-Wert Düngung*
Jahr	Prüfglieder						
	Kontrolle	Kalk	Mineral	Kompost	Pf.-Mist	Häcksel	
2009	76,7	74,6	75,6	67,2	73,0	73,7	0,7348
2010	59,2	66,9	70,1	82,5	45,8	73,4	0,1847

* einfaktorieller F-Test

Das Ertragsniveau an oberirdischer Sprossmasse des Rotklees (Summe aus drei Schnitten und der Stoppel nach dem dritten Schnitt) lag im Jahr 2009 im Mittel der Prüfglieder mit 120 dt ha⁻¹ TM signifikant über dem Wert des Jahres 2010 mit 99 dt ha⁻¹ (Tab. A 37). In Abb. 15 sind die Schnittguterträge des Rotklees für beide Jahre einzeln dargestellt, da die zweifaktorielle Auswertung der Einzelschnitte eine signifikante Wechselwirkung zwischen Düngung und Jahr im ersten Schnitt ergab. Die höchste Spross-TM im Vergleich der Prüfglieder wurde im Jahr 2009 nach der Düngung von Pferdemit mit 129 dt ha⁻¹ ermittelt. Der Ertrag des Rotklees lag hiermit um 17 % über dem Ertrag der Kontrolle, in welcher 111 dt ha⁻¹ TM erreicht wurden (nicht signifikant verschieden).

Insbesondere zum dritten Schnitttermin nach der Düngung von Pferdemist zeigte sich in diesem Jahr ein signifikanter Unterschied ($29 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$) gegenüber der Kontrolle ($23 \text{ dt ha}^{-1} \text{ TM}$).

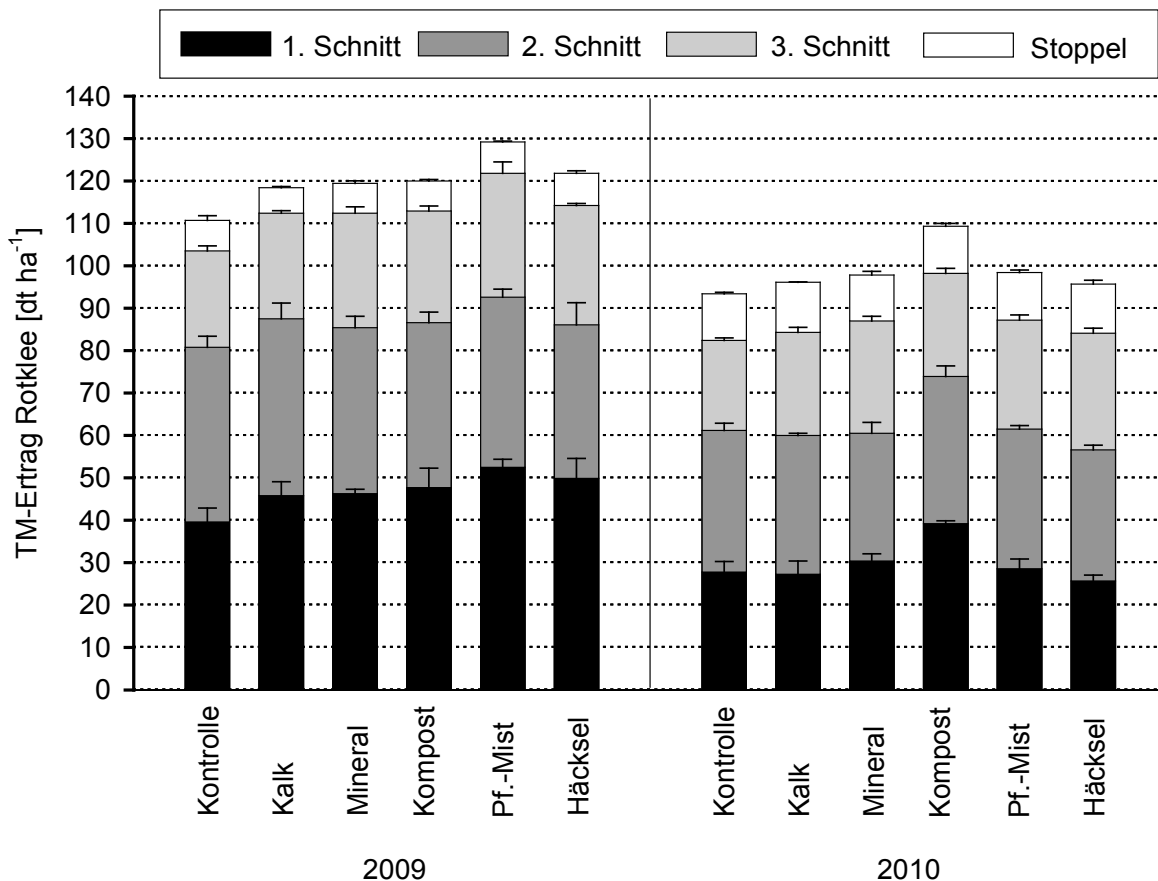


Abb. 15: Einfluss der Düngung auf den Schnittgutertrag von Rotklee an 3 Schnittterminen und der Stoppelmasse nach dem letzten Schnitt in den Jahren 2009 und 2010

Im Jahr 2010 erzielte der Rotklee nach der Düngung von Grüngutkompost die signifikant höchste Spross-TM aller Prüfglieder mit 109 dt ha^{-1} gegenüber der Kontrolle mit 94 dt ha^{-1} (+14 %). Zum ersten Schnitttermin lag die Schnittgut-TM des Rotklees nach der Grüngutkompostdüngung signifikant über den Erträgen in den anderen Prüfgliedern. Zum dritten Schnitttermin lagen die Schnittgut-TM des Rotklees in den Varianten mit mineralischer Düngung und mit Gehölzhäcksel signifikant über dem Ertrag in der Kontrolle.

Die Spross-TM des Welschen Weidelgrases lag mit 55 dt ha^{-1} (Summe von drei Schnittterminen) im Jahr 2009 signifikant unter dem Wert des Jahres 2010 mit 75 dt ha^{-1} (Abb. 16). Damit reagierte das Welsche Weidelgras im Mittel der Varianten

hinsichtlich des Schnittgutertrages entgegengesetzt zum Rotklee in den beiden Jahren (siehe auch Tab. A 37).

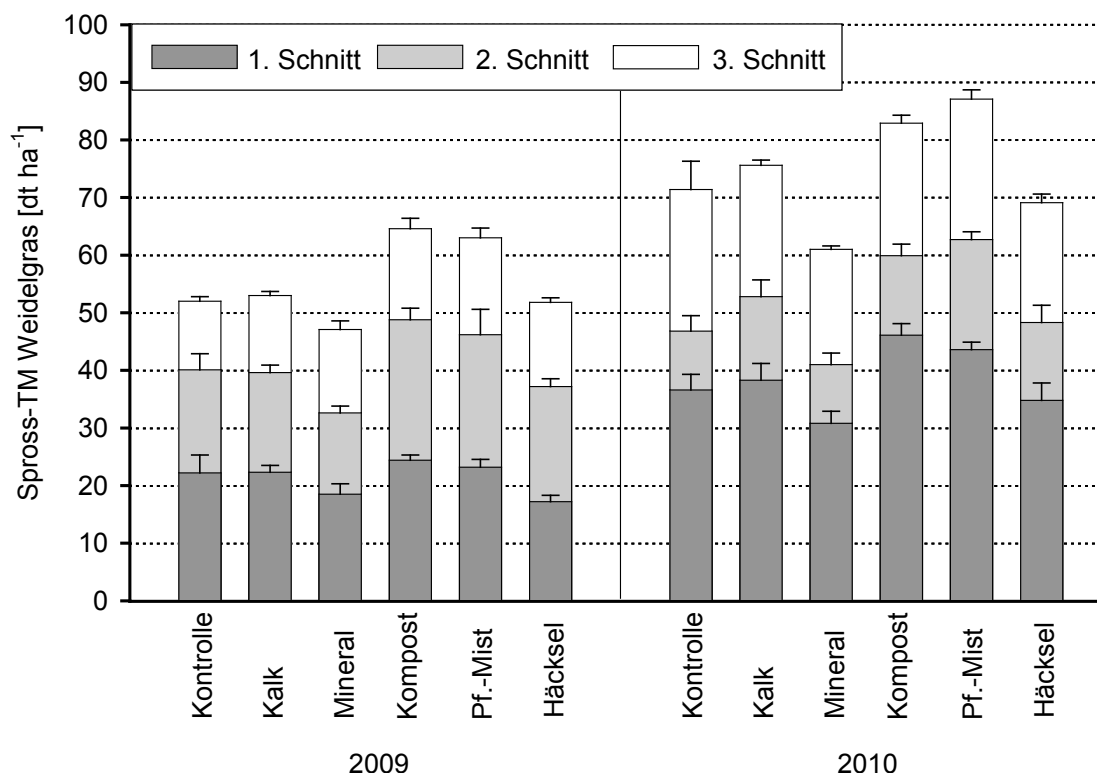


Abb. 16: Einfluss der Düngung auf den Sprossertrag des Welschen Weidelgrases zu drei Schnittterminen in den Jahren 2009 und 2010

Die Spross-TM des Welschen Weidelgrases lag in beiden Jahren am höchsten in den Varianten Grüngutkompost und Pferdemist im Vergleich zu den anderen Prüfgliedern. In der Variante Mineral wurde - im Gegensatz zum Rotklee - jeweils der geringste Ertrag aller Prüfglieder erzielt (signifikant verschieden gegenüber dem Ertrag in der Variante Grüngutkompost im Jahr 2009 und 2010 sowie gegenüber der Variante Pferdemist im Jahr 2010). Dies macht die verbesserte Verfügbarkeit an mineralischem Stickstoff im Boden nach der Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist gegenüber der mineralisch gedüngten Variante deutlich. Das zeigt auch die um 44 bis 58 % teils signifikant erhöhte N-Aufnahme des Welschen Weidelgrases in diesen Prüfgliedern gegenüber der Kontrolle und der Variante Mineral (Tab. A 40). Effekte, welche zu einer verminderten Keimung von Unkrautsamen oder Bildung an Unkrautsprossmasse führten, wie sie beim Unkraut in der Ackerbohne beobachtet wurden, konnten in Rotklee und Welschem Weidelgras nicht festgestellt werden.

3.2.3 N_{\min} -Vorrat im Boden

Die Ermittlung des N_{\min} -Vorrates im Boden unter Ackerbohne und Rotklee erfolgte wie bei der Saatplatterbse jeweils zum Zeitpunkt der Ernte und zum Zeitpunkt der Ernte des nachfolgenden Weizens. Zusätzlich wurde eine Beprobung vor der Saat der Ackerbohne und des Rotklees im Frühjahr, etwa 40 Tage nach der Saat und im Frühjahr des Folgejahres zum Winterweizen mit dem Ziel durchgeführt, um Veränderungen der N_{\min} -Vorräte im Boden aufgrund der Düngung zeitlich genauer darstellen zu können.

Der N_{\min} -Vorrat im Boden etwa 40 Tage nach der Saat der Ackerbohne zeigte in den Jahren 2009 und 2010 insbesondere in den organisch gedüngten Varianten in einer Tiefe von 0 bis 30 cm eine charakteristische Abstufung. So lagen die Vorräte an N_{\min} in der Variante nach Düngung von Grüngutkompost mit 20 (2009) bzw. 28 kg ha⁻¹ (2010) jeweils signifikant über den Mengen der Variante Gehölzhäcksel, in der 9 bzw. 4 kg ha⁻¹ vorlagen (Abb. 17, Tab. A 21 und Tab. A 22).

Der N_{\min} -Vorrat im Boden in der Variante Pferdemist lag in 0 bis 30 cm Tiefe mit 15 kg ha⁻¹ im Jahr 2009 und 12 kg ha⁻¹ im Jahr 2010 jeweils zwischen den Vorräten der Varianten Grüngutkompost und Gehölzhäcksel. Diese Abstufung zeigte sich im Jahr 2009 in der Tiefenstufe 0 bis 30 cm auch nach der Ernte der Ackerbohne (nicht signifikante Unterschiede zwischen den Prüfgliedern) und im Frühjahr unter dem nachfolgenden Winterweizen in der Tiefenstufe 30 bis 60 cm (signifikanter Effekt der Düngung, Abb. 17a).

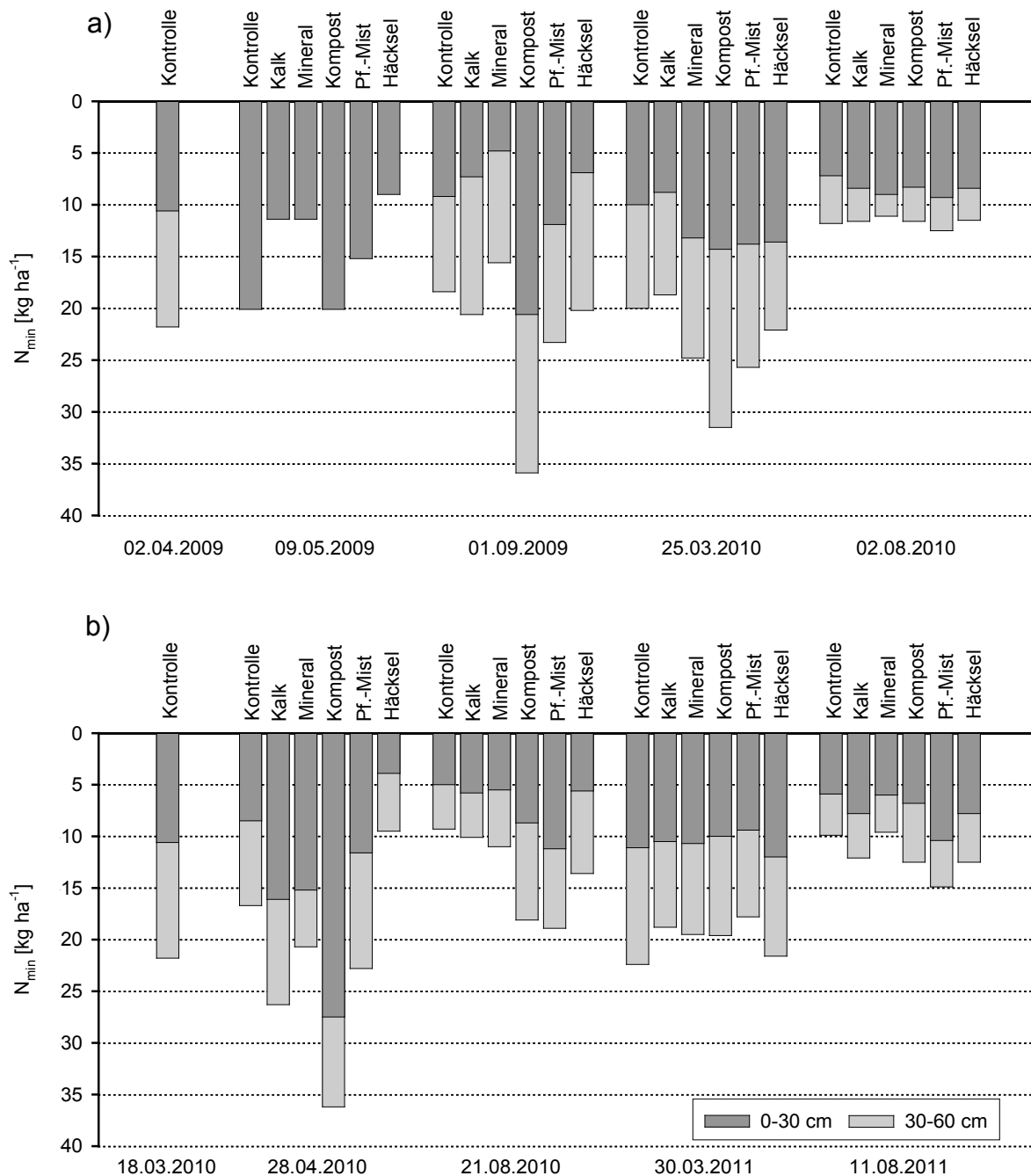


Abb. 17: Einfluss der Düngung auf den N_{\min} -Vorrat im Boden unter Ackerbohne und nachfolgendem Winterweizen in den Jahren 2009 / 2010 (a) und 2010 / 2011 (b)

Im Jahr 2010 wurde nach der Ernte der Ackerbohne ein signifikanter Unterschied im N_{\min} -Vorrat des Bodens zwischen den Varianten Pferdemist und Gehölzhäcksel festgestellt, während sich die Werte unter dem nachfolgenden Winterweizen nur noch in sehr geringem Maße unterschieden. Bei Rotklee wurde in den Jahren 2009 und 2010 wie bei der Ackerbohne eine signifikante Abstufung des N_{\min} -Vorrates im

Boden (Grüngutkompost > Pferdemist > Gehölzhäcksel) in einer Tiefe von 0 bis 30 cm etwa 40 Tage nach der Saat festgestellt, welche sich im Jahr 2009 auch nach der letzten Ernte des Rotklees erkennen ließ (nicht signifikant), nicht jedoch im Jahr 2010 und in beiden Jahren zu den jeweils späteren Terminen der Probenahme (Abb. 18, Tab. A 23, Tab. A 24).

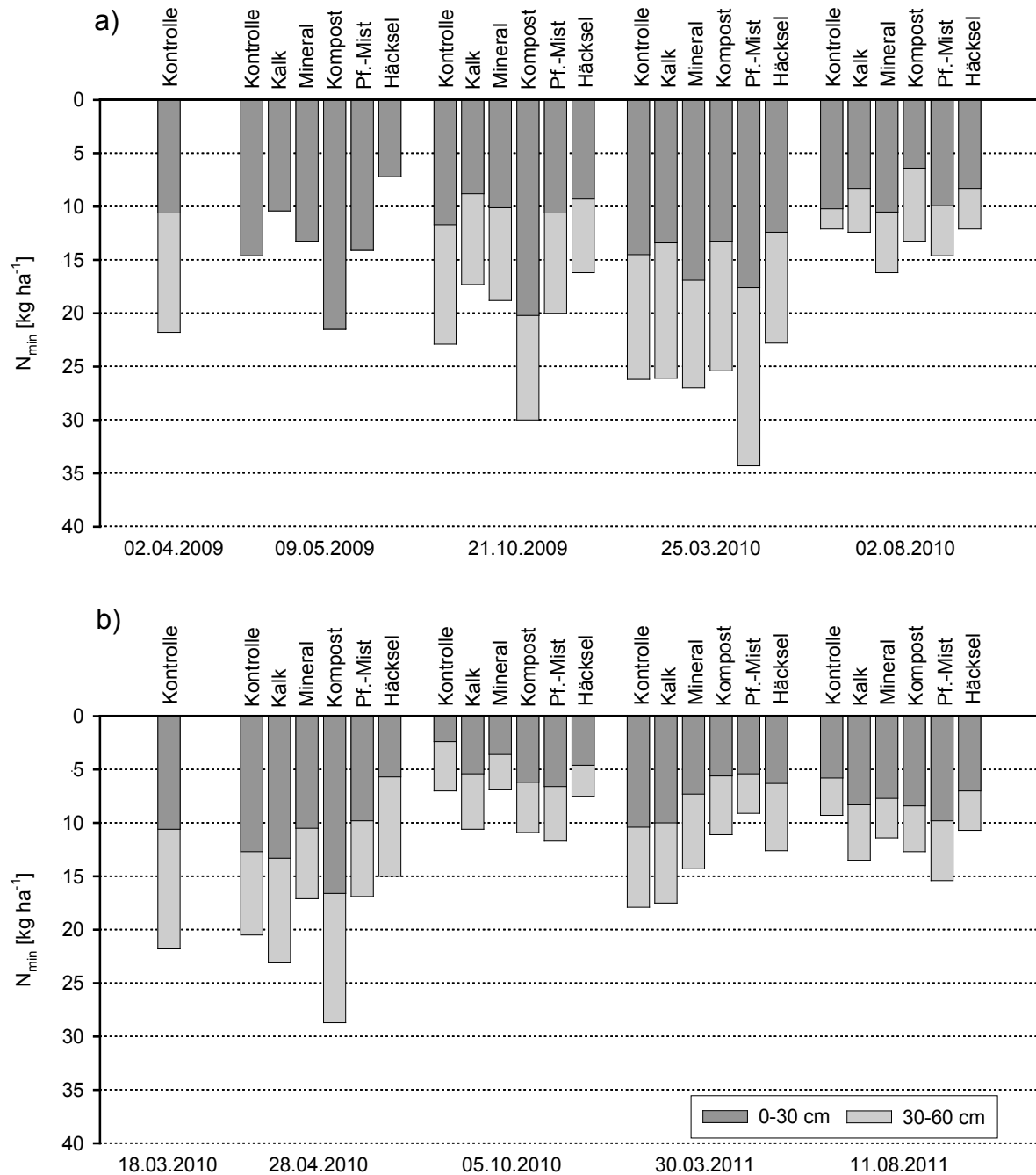


Abb. 18: Einfluss der Düngung auf den N_{\min} -Vorrat im Boden unter Rotklee und nachfolgendem Winterweizen in den Jahren 2009 / 2010 (a) und 2010 / 2011 (b)

Die festgestellte Abstufung hinsichtlich des N_{\min} -Vorrates im Boden etwa 40 Tage nach der Saat der Leguminosen lässt sich mit dem C/N-Verhältnis der ausgebrachten organischen Düngemittel begründen. Offenbar war zu diesem Zeitpunkt nach der Düngung von Gehölzhäcksel bereits ein Teil des mineralischen Stickstoffs im Boden mikrobiell eingebunden, während nach der Düngung von Pferdemist etwa die Menge an N_{\min} der Kontrollvariante im Boden vorhanden war und nach der Düngung von Grüngutkompost tendenziell ein höherer N_{\min} -Vorrat im Boden vorlag. Im Jahr 2009 lagen die N_{\min} -Vorräte im Boden in den untersuchten Tiefenstufen im Mittel der Prüfglieder sowohl zum Zeitpunkt der Ernte des Rotklees als auch im folgenden Frühjahr zu Weizen deutlich über den jeweiligen Werten des Folgejahres, was auf eine insgesamt gesteigerte biologische Aktivität im Boden verbunden mit einer hohen N-Mineralisierung in diesem Jahr schließen lässt. Es ist ferner von einem Einfluss der Wasserzufuhr in den Boden auf die N-Mineralisierung im Boden auszugehen. So lag die Höhe der Niederschläge im Jahr 2009 im Zeitraum vom 11. Juli bis zur letzten Ernte des Rotklees (95 Tage) bei 183 mm, im Jahr 2010 hingegen bei 476 mm. Die Lufttemperatur betrug in diesem Zeitraum im Tagesmittel in beiden Jahren 17,5 °C und kommt deshalb als variierende Größe der N-Mineralisierung nicht in Betracht. Die sowohl aus der höheren N-Aufnahme des Rotklees (+23 kg ha⁻¹) und des Welschen Weidelgrases (+32 kg ha⁻¹) aus dem Boden gegenüber der Kontrolle im Jahr 2009 abgeleitete höhere N-Verfügbarkeit im Boden nach der Düngung von Pferdemist gegenüber der Kontrolle ist anhand der ermittelten N_{\min} -Vorräte im Boden nicht erkennbar.

3.2.4 Nährstoffaufnahme

Wie bei der Saatplatterbse sollten auch zu Ackerbohne und Rotklee die kurzfristige Verfügbarkeit und die Aufnahme der mit den Düngemitteln ausgebrachten Nährstoffe geprüft werden.

3.2.4.1 Nährstoffgehalte im Blatt der Ackerbohne

Bei der Ackerbohne wurden, im Gegensatz zur Saatplatterbse und zum Rotklee, jeweils die jüngsten vollentwickelten Blätter zum Zeitpunkt der Blüte (BBCH 65) im Jahr 2009 und zum Zeitpunkt der Fruchtentwicklung (BBCH 78) im Jahr 2010 zur Bestimmung der Nährstoffgehalte und zur Ableitung des Versorgungszustandes der Ackerbohne bzw. der Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen entnommen (siehe auch Kapitel 2.5.2).

Die Gehalte der im Blatt der Ackerbohne bestimmten Nährstoffe lagen im Jahr 2009 jeweils deutlich über den Werten des Jahres 2010. So lag der P-Gehalt im Mittel der Prüfglieder im Jahr 2009 bei $3,8 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ gegenüber $2,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2010, der S-Gehalt bei $3,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2009 gegenüber $2,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2010 und der K-Gehalt mit einem etwas geringeren Unterschied zwischen den Jahren bei $26 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2009 gegenüber $21 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ im Jahr 2010. Als Ursache ist vor allem die Entnahme der Blätter zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt der Ackerbohne im zweiten Versuchsjahr und der damit verbundenen Translokation von Nährstoffen in die gebildeten Fruchtstände der Pflanzen (HIMMELBLAU & AMASINO 2001) bzw. der mit zunehmendem Alter der Pflanzen insgesamt abnehmende Nährstoffgehalt im Blatt (SPENCER et al. 1977) zu sehen.

Unterschiede der Nährstoffgehalte im Blatt der Ackerbohne in Abhängigkeit von der Düngung wurden dennoch in beiden Jahren festgestellt (Abb. 19).

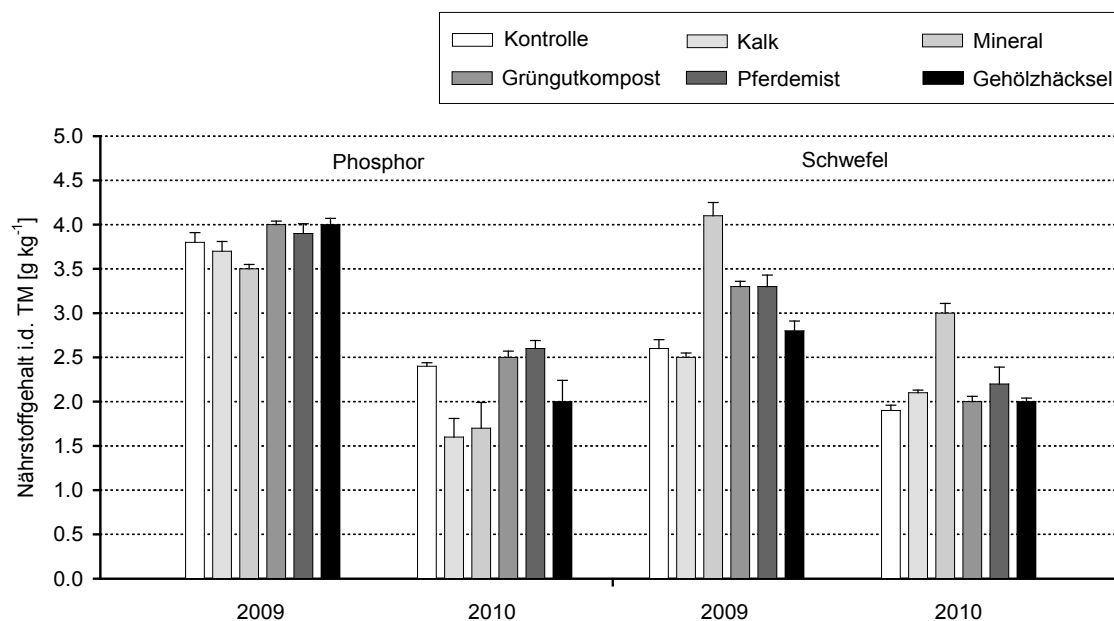


Abb. 19: Einfluss der Düngung auf den Gehalt an Phosphor und Schwefel in der Blatt-TM der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010

Die Gehalte an Phosphor im Blatt der Ackerbohne zum BBCH-Stadium 65 im Jahr 2009 lagen im Bereich zwischen $3,9$ bis $4,0 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ in allen organisch gedüngten Variantensignifikant über dem Wert der Variante mit mineralischer Düngung. Der P-Gehalt in der Kontrolle lag bei $3,8 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$. Auch im Jahr 2010 lag der P-Gehalt in der Ackerbohne nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat mit $1,7 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ signifikant unter den Werten nach der Düngung von Pferdemist ($2,6 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) und

Grüngutkompost ($2,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$), sowie der Kontrolle mit $2,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass im Jahr 2009 in allen Prüfgliedern mit organischer Düngung - auch bei Gehölzhäcksel mit einem C/N-Verhältnis von 62 und einer gedüngten Menge von 23 kg ha^{-1} - die Verfügbarkeit an Phosphor im Boden gegenüber der Kontrolle erhöht war. Dies bedeutet, dass der organisch gebundene Phosphor in den ausgebrachten organischen Düngemitteln unabhängig vom C/N-Verhältnis des organischen Düngemittels im Zeitraum von 77 Tagen offenbar zu einem Teil pflanzenverfügbar und von der Ackerbohne offensichtlich verstärkt aufgenommen wurde. Der in beiden Jahren festgestellte, deutlich geringere P-Gehalt im Blatt der Ackerbohne in der Variante Mineral gegenüber der Kontrolle und den anderen Düngewarianten deutet darauf hin, dass das gedüngte weicherdige Rohphosphat (gedüngte P-Menge jeweils 102 kg ha^{-1}) offenbar nur sehr langsam bzw. in sehr geringem Umfang in eine pflanzenverfügbare Form im Boden umgewandelt wurde.

Der Gehalt an Schwefel im Blatt der Ackerbohne lag im Jahr 2009 in der Variante Mineral mit $4,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ signifikant über den Werten der Varianten Pferdemist und Grüngutkompost mit jeweils $3,3 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$, welche sich wiederum signifikant von den Varianten Gehölzhäcksel ($2,8 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$), Kalk ($2,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) und der Kontrolle mit $2,6 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ unterschieden. Auch im Jahr 2010 lag der S-Gehalt im Blatt der Ackerbohne mit $2,9 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ signifikant über den Werten der Vergleichsvarianten. Der niedrigste S-Gehalt wurde in der Kontrolle mit $1,9 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ ermittelt. Die in sehr hoher Menge und in wasserlöslicher Form (K_2SO_4) gedüngte Schwefelmenge von 173 kg ha^{-1} in der Variante Mineral führte zu einer deutlich höheren S-Aufnahme der Ackerbohne gegenüber der Kontrolle ohne Düngung. Auch nach der Düngung von Pferdemist und Grüngutkompost wurden im Jahr 2009 deutlich höhere S-Gehalte im Blatt der Ackerbohne gegenüber der Kontrolle festgestellt, was auf eine Nachlieferung an Schwefel in pflanzenverfügbarer Form aus dem applizierten und eingearbeiteten organischen Düngemitteln in diesen Varianten schließen lässt. Im Jahr 2010 war dieser Effekt nicht erkennbar.

Im Jahr 2009 lagen die Gehalte an Kalium im Blatt der Ackerbohne vor allem nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat ($24,4 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) und Grüngutkompost ($23,8 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) deutlich über dem Wert der Kontrolle mit $17,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ (Unterschiede signifikant verschieden, Abb. 20).

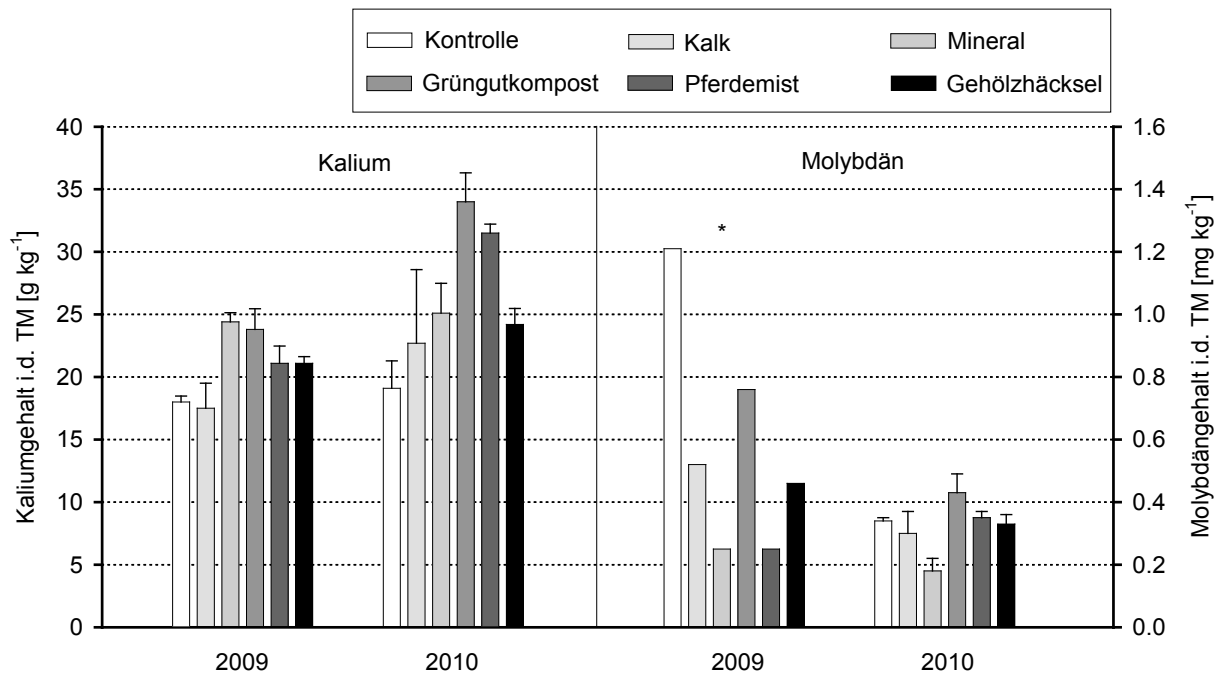


Abb. 20: Einfluss der Düngung auf den Gehalt an Kalium und Molybdän in der Blatt-TM der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010, * Nährstoffanalyse nur in einer Wiederholung durchgeführt

Im Jahr 2010 wurde der signifikant niedrigste K-Gehalt im Blatt der Ackerbohne in der Kontrolle mit $19,1 \text{ g kg}^{-1}$ TM gegenüber dem Wert nach der Düngung von Grüngutkompost mit 34 g kg^{-1} TM ermittelt. Auch nach der Düngung von Pferdemist, Dolophos / Kaliumsulfat und Gehölzhäcksel wurden in diesem Jahr jeweils deutlich höhere K-Gehalte in der Blatt-TM der Ackerbohne festgestellt (nicht signifikant). Die Ergebnisse zeigen, dass - anders als bei Phosphor und Schwefel - die Aufnahme von Kalium nach der Düngung der organischen Düngemittel unabhängig vom Jahreseinfluss deutlich gestiegen ist. Das bedeutet, dass das im applizierten organischen Material enthaltene Kalium sehr schnell freigesetzt und in der größtenteils vorliegenden Form als K^+ -Ion pflanzenverfügbar geworden ist. Darauf deuten auch die Ergebnisse der Gehalte und Entzüge bei der Saatplatterbse hin (Kapitel 3.1.3, Abb. 7 b). Der im Vergleich der Prüfglieder deutlich höhere Gehalt an Kalium in der Variante Grüngutkompost im Jahr 2010 lässt sich vor allem auf die hohe Menge an gedüngtem Kalium von 569 kg ha^{-1} zurückführen (vergl. Tab. A 7). Die Darstellung der ermittelten Gehalte an Molybdän soll die unterschiedliche Wirkung der organischen Düngung im Vergleich zur hier genutzten Mineraldüngung hinsichtlich der Anzahl und des mengenmäßigen Verhältnisses der Nährstoffe

zueinander im Düngemittel verdeutlichen. Da im Jahr 2009 lediglich nur eine Wiederholung je Variante der Blattproben der Ackerbohne analysiert wurde, konnten nur die Werte aus dem Jahr 2010 varianzanalytisch ausgewertet werden. Der Mo-Gehalt im Blatt der Ackerbohne lag im Jahr 2010 nach der Düngung von Grüngutkompost mit $0,49 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ signifikant über den Werten der Varianten Gehölzhäcksel, Mineral und der Kontrolle. Insbesondere in der Variante Mineral wurde mit einem Gehalt von $0,25 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ im Blatt der Ackerbohne offenbar deutlich weniger Molybdän als in der Kontrolle mit $0,34 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ aufgenommen, was bei der Saatplatterbse nicht festgestellt wurde. Möglicherweise könnte die Mo-Aufnahme der Ackerbohne durch die hohe Menge an gedüngtem Schwefel (173 kg ha^{-1}) in diesem Prüfglied beeinträchtigt worden sein.

3.2.4.2 Nährstoffgehalt und Nährstoffentzug des Rotklees

Die Spross-TM des Rotklees wurde in Form einer Mischprobe aus drei Schnittterminen und den Stoppeln hinsichtlich des Gehaltes an Nährstoffen analysiert, wobei die einzelnen Schnittgutmassen und die Stoppelmasse entsprechend ihrer Anteile an der Spross-TM berücksichtigt wurden. Zusätzlich wurden in beiden Versuchsjahren die Nährstoffgehalte des Schnittgutes zum ersten Schnitttermin ermittelt, da dieser den höchsten Ertrag der drei Schnitte erbrachte und damit verbunden eine entsprechend hohe Nährstoffaufnahme zu erwarten war. Dargestellt werden im Folgenden analog zur Saatplatterbse und zur Ackerbohne die Gehalte und die Entzüge des Rotklees an Phosphor, Schwefel, Kalium und Molybdän.

Im Jahr 2009 lag der P-Gehalt im Schnittgut des ersten Schnittes nach der Düngung von Pferdemist bei $3,0 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ und damit leicht über dem Wert der Kontrolle mit $2,7 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ (Abb. 21). In der Gesamt-TM des Rotklees (Mischprobe aus 3 Schnittgutmassen und der Stoppelmasse) verringerte sich der Unterschied zwischen den genannten Prüfgliedern auf $0,1 \text{ g P kg}^{-1} \text{ TM}$. Auch beim Entzug an Phosphor wurde im Schnittgut des 1. Schnittes noch ein signifikanter Unterschied nach der Düngung von Pferdemist mit $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ und der Kontrolle mit $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ festgestellt, welcher in der Gesamt-TM des Rotklees ($33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ nach Pferdemist und $29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ in der Kontrolle) nicht mehr ersichtlich war. Auch im Jahr 2010 wurde mit einer Differenz von $0,4 \text{ g P kg}^{-1} \text{ TM}$ ein signifikanter Unterschied des P-Gehaltes im Schnittgut des ersten Schnittes zwischen den Varianten der Düngung

Rotkleesprosses mit 0,1 g P kg⁻¹ TM nicht mehr festzustellen war.

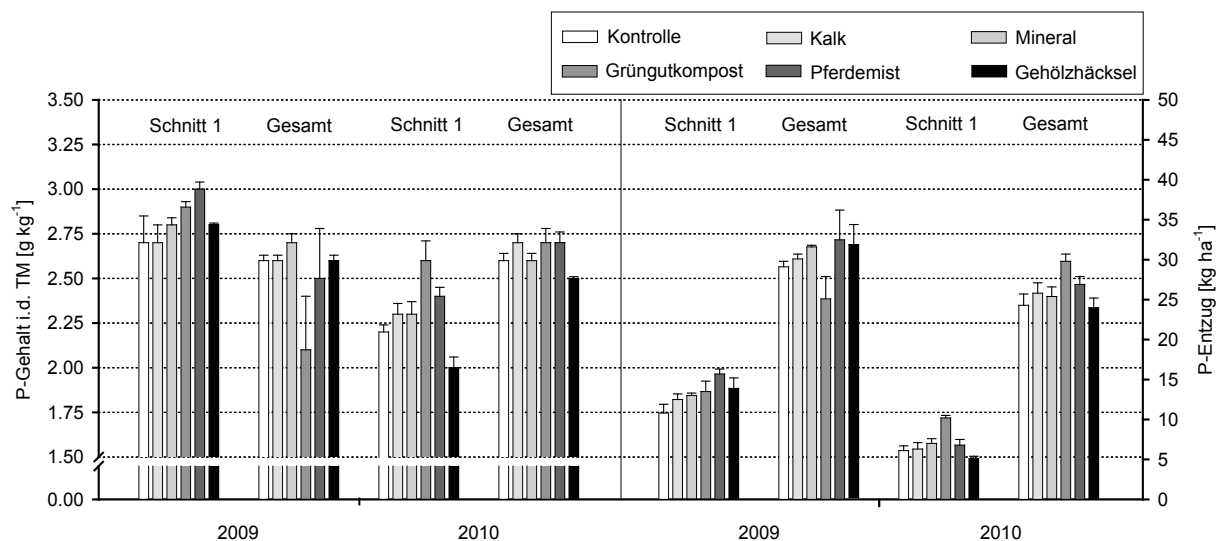


Abb. 21: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Phosphor mit dem Schnittgut des ersten Schnittes und mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010

Während die P-Gehalte und P-Entzüge im Jahr 2009 nach der Düngung von Pferdemist und im Jahr 2010 nach der Düngung von Grüngutkompost jeweils über den Werten der Kontrolle lagen, zeigte sich insbesondere im Jahr 2010 nach der Düngung von Gehölzhäcksel sowohl im ersten Schnitt des Rotklees als auch im Vergleich der Gesamt-TM des Rotklees ein jeweils geringerer P-Gehalt und P-Entzug gegenüber den anderen Prüfgliedern (signifikant verschieden im Vergleich zur Variante Grüngutkompost).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verfügbarkeit an Phosphor im Boden aufgrund der Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist offenbar vor allem im Zeitraum bis zum ersten Schnitt des Rotklees (100 Tage nach Saat) erhöht war. Da bei pflanzenverfügbaren P-Gehalten im Boden am Versuchsstandort zwischen 5,8 und 6,8 mg je 100 g Boden von einer guten P-Versorgung des Bodens ausgegangen werden kann (vergl. Tab. 2 in Kapitel 2.1), ist es wahrscheinlich, dass im Zeitraum bis zum dritten Schnitt des Rotklees (200 Tage nach Saat) auch in den Vergleichsvarianten einschließlich der Kontrolle verstärkt Phosphor aus Vorräten im Boden bereitgestellt und vom Rotklee aufgenommen wurde.

Die Gehalte an Schwefel wurden beim Rotklee nur in der Gesamt-Spross-TM eines Jahres bestimmt, nicht jedoch im Schnittgut des ersten Schnittes. In beiden Jahren

wurden nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat mit $1,2 \text{ g kg}^{-1}$ TM im Jahr 2009 (signifikant) und mit $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ TM im Jahr 2010 höhere S-Gehalte in der Spross-TM des Rotklees ermittelt, während sich die S-Gehalte in der Sprossmasse der anderen Prüfglieder nur wenig unterschieden (Abb. 22).

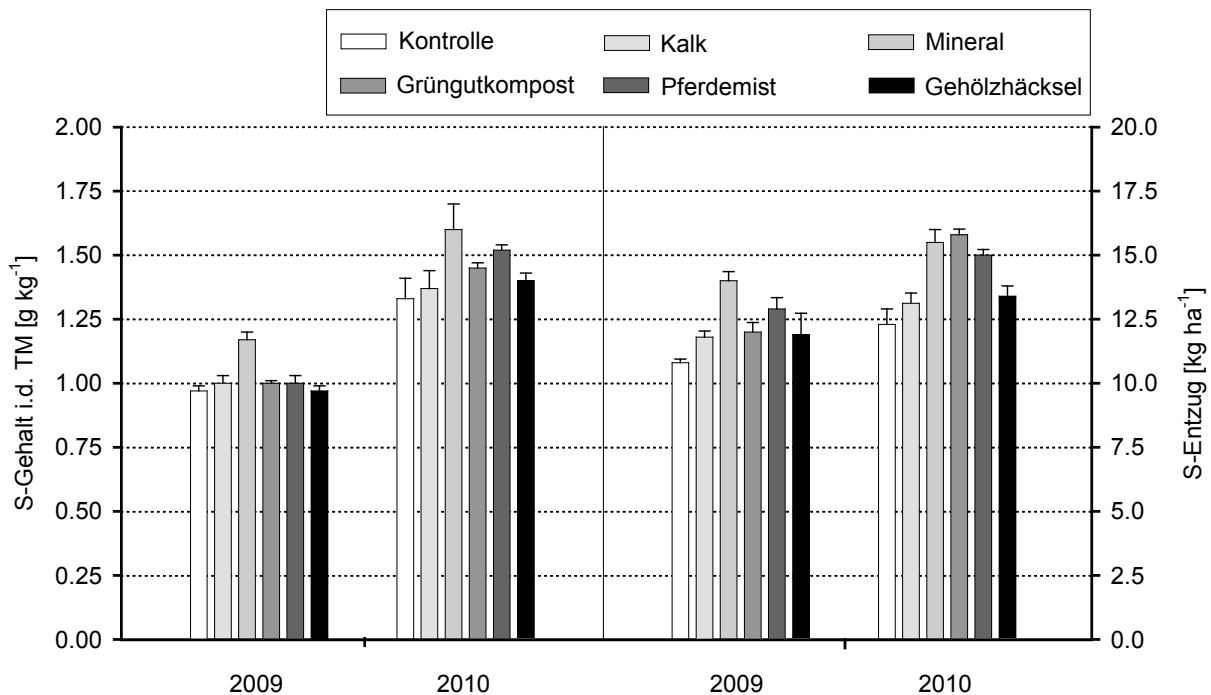


Abb. 22: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Schwefel mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010

Die ermittelten Entzüge an Schwefel mit der Spross-TM des Rotklees lagen in Abhängigkeit von der Düngung zwischen 11 und 16 kg ha^{-1} und damit nur wenig höher im Vergleich zur Saatplatterbse. Im Jahr 2009 wurde mit 14 kg ha^{-1} in der Variante Mineral und mit 13 kg ha^{-1} in der Variante Pferdemist signifikant mehr Schwefel entzogen als in der Kontrolle, in welcher der Rotklee 12 kg ha^{-1} entzog. Im Jahr 2010 wurde mit 15 kg ha^{-1} in der Variante Mineral und mit 16 kg ha^{-1} in der Variante Grüngutkompost signifikant mehr Schwefel entzogen als in der Kontrolle mit 12 kg ha^{-1} . Die Ergebnisse zum Rotklee stimmen hinsichtlich der jeweils festgestellten erhöhten S-Gehalte und S-Entzüge nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat mit den zu Saatplatterbse und Ackerbohne ermittelten Ergebnissen überein und zeigen eine gute Verfügbarkeit und Aufnahme an Schwefel aufgrund der pflanzenverfügbaren Form (Sulfat-Schwefel) und der hohen Menge des gedüngten Schwefels in Höhe von 173 kg ha^{-1} . Ersichtlich wird, dass in Folge des insgesamt geringen S-Entzuges des Rotklees auch ein steigender Bedarf an

Schwefel, etwa aufgrund einer höheren Bildung an Spross-TM, aus Grüngutkompost und Pferdemist gedeckt werden kann und zu signifikant höheren Entzügen führt, auch wenn die mit den organischen Düngemitteln ausgebrachten Mengen an Schwefel mit 77 bzw. 86 kg ha⁻¹ (Grüngutkompost) und 45 bzw. 61 kg ha⁻¹ (Pferdemist) im Vergleich mit der ausgebrachten S-Menge in der Variante Mineral deutlich geringer waren. Das zeigt, dass im Zeitraum des Wachstums des Rotklee von etwa 196 bzw. 200 Tagen offenbar ausreichend Schwefel aus den gedüngten organischen Düngemitteln bereitgestellt wurde. Nach der Düngung von Gehölzhäcksel wurde gegenüber der Kontrolle sowohl bei der Saatplatterbse als auch beim Rotklee ein gleich hoher bzw. tendenziell höherer Entzug an Schwefel festgestellt, was darauf schließen lässt, dass die Verfügbarkeit an Schwefel im Boden in dieser Variante offenbar nicht eingeschränkt war. Andererseits lässt sich jedoch eine Verfügbarkeit an Schwefel in Abhängigkeit des C/N-Verhältnisses der applizierten organischen Düngemittel anhand der ermittelten Gehalte im Rotklee und Entzüge des Rotklee nur unter Vorbehalt ableiten, da z.B. die mit dem Gehölzhäcksel ausgebrachten Mengen an Schwefel mit 22 bzw. 23 kg ha⁻¹ deutlich unter den Mengen der anderen, hier geprüften organischen und mineralischen Düngemittel lagen.

Die Gehalte an Kalium im Schnittgut des ersten Schnittes und im Spross des Rotklee lassen in beiden Jahren eine deutlich erhöhte Verfügbarkeit an Kalium im Boden sowohl im Zeitraum von der Saat bis zum ersten Schnitt als auch darüber hinaus bis zur Ernte des dritten Aufwuchses des Rotklee erkennen (Abb. 23). Die Gehalte an Kalium im Schnittgut des ersten Schnittes lagen im Jahr 2009 nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat mit 41,8 g kg⁻¹ TM und nach Düngung von Pferdemist mit 40,5 g kg⁻¹ TM jeweils signifikant über dem Gehalt in der Kontrolle mit 31,5 g kg⁻¹ TM. Im Jahr 2010 wurden mit 43,8 g kg⁻¹ TM nach der Düngung von Grüngutkompost, mit 38,2 g kg⁻¹ TM nach der Düngung von Pferdemist und mit 36,6 g kg⁻¹ TM in der Variante Mineral jeweils signifikant höhere Gehalte an Kalium im Schnittgut des Rotklee gegenüber der Kontrolle mit 28,6 g kg⁻¹ TM ermittelt. Der deutliche Unterschied im K-Gehalt des Schnittgutes einzelner Prüfglieder gegenüber der Kontrolle wurde auch in der Gesamt-Spross-TM des Rotklee festgestellt und war zudem in den Varianten Grüngutkompost und Pferdemist im Jahr 2010 signifikant.

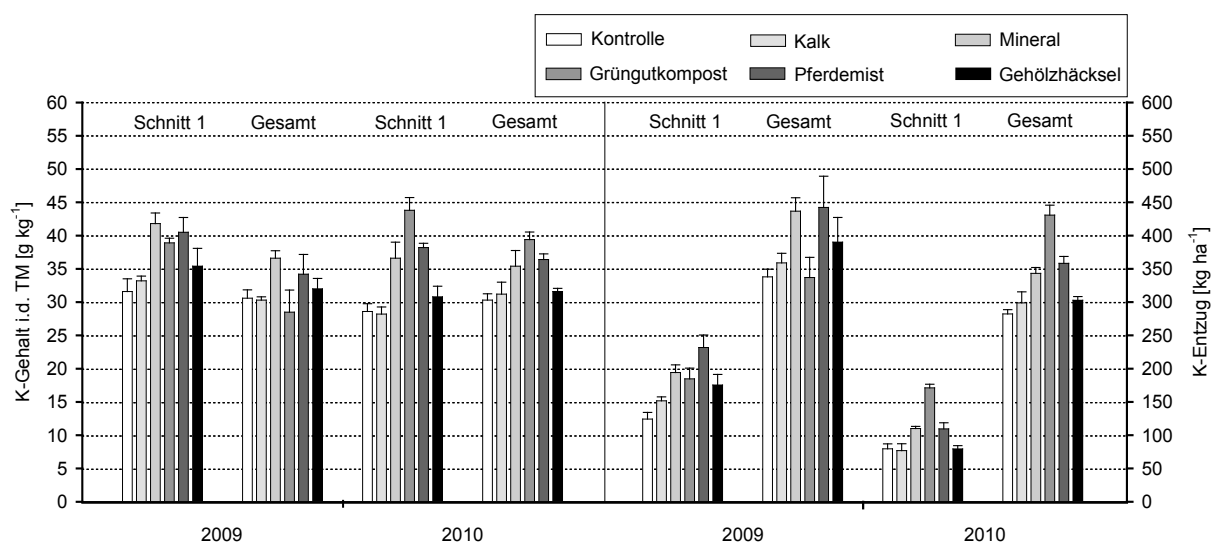


Abb. 23: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Kalium mit dem Schnittgut des ersten Schnittes und mit dem Spross des Rotklee (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010

Entsprechend des Ertrages an Spross-TM des Rotklee der Prüfglieder (vergl. Abb. 15 in Kapitel 3.2.2) wurden vor allem nach der Düngung von Pferdemit, Grüngutkompost und Dolophos / Kaliumsulfat im Jahr 2009 und nach der Düngung von Grüngutkompost im Jahr 2010 signifikant höhere Entzüge an Kalium mit dem Schnittgut des ersten Schnittes gegenüber der Kontrolle ermittelt. Auch bei den Entzügen an Kalium mit der Gesamt-Spross-TM wurden vor allem im Jahr 2010 signifikant höhere Mengen an Kalium nach organischer und mineralischer Düngung festgestellt. So wurden im Jahr 2009 in der Variante Pferdemit 104 kg ha^{-1} an Kalium mehr als in der Kontrolle mit der Spross-TM des Rotklee entzogen (nicht signifikant verschieden) und im Jahr 2010 in der Variante Grüngutkompost $148 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$ (signifikant verschieden zur Kontrolle).

Die ermittelten Gehalte und Entzüge an Kalium bei der Saatplatterbse und beim Rotklee sowie die K-Gehalte im Blatt der Ackerbohne lassen erkennen, dass die Verfügbarkeit von Kalium im Boden nach Düngung von Pferdemit und Grüngutkompost deutlich zunahm.

Nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat wurden in beiden Jahren gegenüber den anderen Düngevarianten und der Kontrolle signifikant geringere Gehalte und Entzüge an Molybdän sowohl im Schnittgut des ersten Schnittes als auch in der Gesamt-Spross-TM des Rotklee festgestellt (Abb. 24).

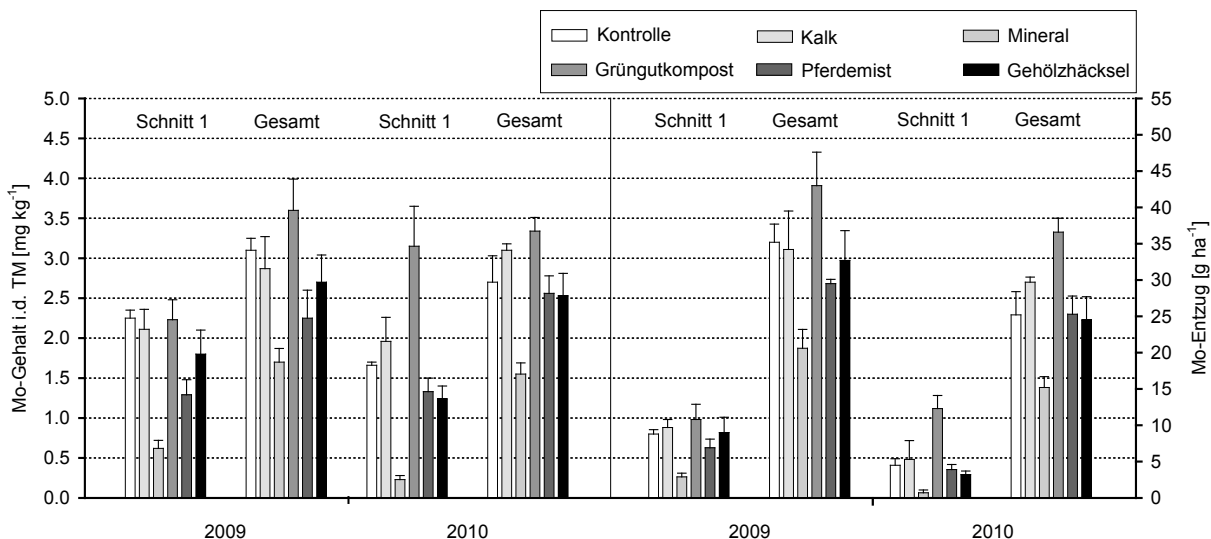


Abb. 24: Einfluss der Düngung auf den Gehalt und Entzug an Molybdän mit dem Schnittgut des ersten Schnittes und mit dem Spross des Rotklee (3 Schnitte + Stoppel) in den Jahren 2009 und 2010

Die Mo-Gehalte lagen nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat bei $0,6 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ gegenüber $2,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ in der Kontrolle im Jahr 2009 und bei $0,2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ gegenüber $1,7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ in der Kontrolle im Jahr 2010 im Schnittgut des ersten Schnittes (Unterschiede in beiden Jahren signifikant).

In der Gesamt-Spross-TM lagen die Werte im Jahr 2009 in der Variante Mineral bei $1,7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ gegenüber $3,1 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ in der Kontrolle und im Jahr 2010 bei $1,6 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ nach mineralischer Düngung gegenüber $2,7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ in der Kontrolle (Unterschied im Jahr 2010 signifikant). Offenbar wurde die Aufnahme von Molybdän aufgrund der hohen Mengen an gedüngtem Schwefel (100 kg ha^{-1}) in einer wasserlöslichen und damit schnell pflanzenverfügbaren Form mit der Düngung des Kaliumsulfates beeinträchtigt. Im Gegensatz dazu wurden in der Variante Grüngutkompost deutlich höhere Gehalte (signifikant im Schnittgut des ersten Schnittes 2009) und Entzüge (signifikant im Schnittgut des ersten Schnittes 2009 und in der Gesamt-Spross-TM 2010) an Molybdän im Vergleich zur Kontrolle ermittelt. Die Menge an gedüngtem Schwefel mit dem Grüngutkompost betrug im Jahr 2009 zu Rotklee 84 kg ha^{-1} und im Jahr 2010 61 kg ha^{-1} . Daraus lässt sich schließen, dass Schwefel und Molybdän im Grüngutkompost - welcher ausschließlich aus biologisch umgesetztem Pflanzenmaterial bestand - in einem für die Aufnahme beider Nährstoffe ausgewogenem Verhältnis vorlagen und im Laufe der Vegetation des Rotklee im Boden pflanzenverfügbar wurden. Im Vergleich zur Saatplatterbse,

wurden die mit mineralischer und organischer Düngung ausgebrachten Nährstoffe teilweise besser durch den Rotklee ausgenutzt (Tab. 16).

Tab. 16: Scheinbare Nährstoffausnutzung durch Rotklee (in Prozent der gedüngten Nährstoffmenge) nach mineralischer und organischer Düngung in den Jahren 2009 und 2010*

Prüfglieder	Scheinbare Nährstoffausnutzung [%]		
	Phosphor	Kalium	Schwefel
Mineral	0,3	21,5	4,0
Grüngutkompost	0,8	14,0	2,7
Pferdemist	7,8	23,9	4,5
Gehölzhäcksel	5,1	28,1	3,5
<i>P</i> -Wert Düngung	0,3874	0,8026	0,8679

* Mittelwerte der Jahre 2009 und 2010, F-Test,
keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung × Jahr

Die scheinbare Ausnutzung des gedüngten Phosphors durch den Rotklee lag im Bereich zwischen 0,3 und 7,8 % und die von Schwefel zwischen 2,7 und 4,5 %. Auch beim Rotklee kann die geringe scheinbare Nährstoffausnutzung auf hohe Gehalte im Boden und einer damit verbundenen entsprechend guten Verfügbarkeit an Phosphor und Kalium zurückgeführt werden. Die Ausnutzung des gedüngten Kaliums lag mit Werten zwischen 14 und 28 % deutlich über den Werten der Saatplatterbse. Grund hierfür ist die längere Vegetationszeit des Rotklees mit einem entsprechend hohen Entzug an Kalium über drei Schnitte.

3.2.5 N-Aufnahme der Ackerbohne und des Rotklees

Wie auch bei der Saatplatterbse war hier das Ziel der Untersuchungen, zu prüfen, welchen Einfluss die Düngung hoher N-Mengen mit den organischen Düngemitteln (Grüngutkompost, Pferdemist) auf die Aufnahme an Stickstoff aus dem Boden und aus der Luft durch die Ackerbohne und den Rotklee hat. Gleichzeitig sollte der Frage nachgegangen werden, ob durch die Düngung hoher Mengen organischer Düngemittel mit weitem C/N-Verhältnis (Gehölzhäcksel) über eine Verringerung des

verfügbaren N_{\min} -Vorrates im Boden die Höhe der symbiotischen N_2 -Fixierung beeinflusst wird.

Die N-Menge im Spross der Ackerbohne lag im Mittel der Prüfglieder im Jahr 2009 bei 234 kg ha^{-1} und im Jahr 2010 bei 138 kg ha^{-1} . Während die Spross-TM der Ackerbohne (Korn, Stroh, Blatt) im Mittel der Prüfglieder im Jahr 2010 um 38 % gegenüber dem Vorjahr abnahm, verringerte sich die N-Aufnahme signifikant um 41 %. Dabei verminderte sich die Aufnahme an Stickstoff aus dem Boden durch die Ackerbohne im Jahr 2010 um 54 % gegenüber dem Vorjahr in einem deutlich stärkeren Maße als die symbiotische N_2 -Fixierung, bei der ein Rückgang um 36 % zu verzeichnen war (Abb. 25).

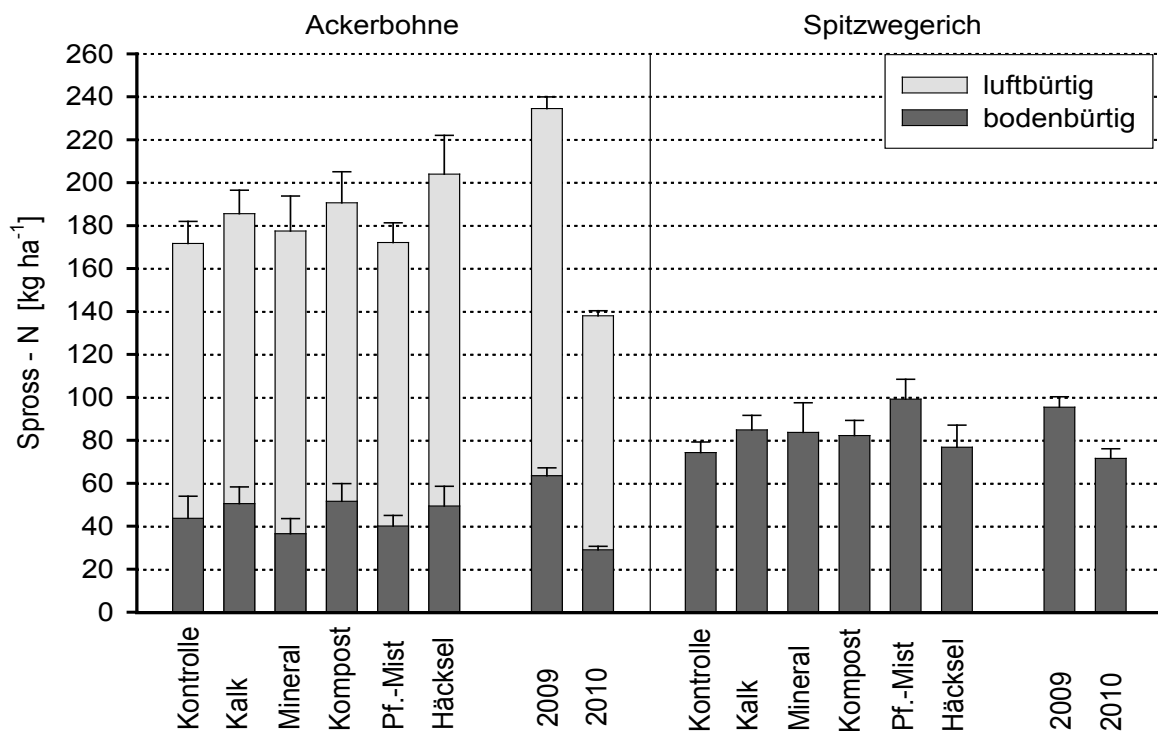


Abb. 25: Einfluss der Düngung auf die Menge an Stickstoff im Spross der Ackerbohne aus dem Boden und über symbiotische N_2 -Fixierung und auf die N-Menge im Spross von Spitzwegerich in den Jahren 2009 und 2010, zweifaktorielle Auswertung, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Jahr

Die Höhe der Spross-N-Menge der Ackerbohne im Mittel von zwei Jahren spiegelte sich im Wesentlichen in der Höhe der ermittelten Spross-TM der einzelnen Prüfglieder wider. Es wurden hinsichtlich des Spross-N der Ackerbohne keine statistisch gesicherten Unterschiede in Abhängigkeit von der Düngung festgestellt.

Bei der varianzanalytischen Einzelauswertung der Jahre unterschied sich die Menge an Spross-N der Ackerbohne nach der Düngung von Pferdemist mit $204,5 \text{ kg ha}^{-1}$ und Gehölzhäcksel mit $270,9 \text{ kg ha}^{-1}$ im Jahr 2009 signifikant, was vor allem auf die deutlichen Unterschiede in der gebildeten Spross-TM zurückzuführen ist (Tab. A 39). Bei der getrennten Varianzanalyse der N-Aufnahme aus dem Boden und der symbiotischen N_2 -Fixierung der Ackerbohne zeigten sich wie auch bei der Spross-N-Menge keine signifikanten Unterschiede zwischen den Prüfgliedern im Mittel von zwei Jahren. Bei der Einzelauswertung der Jahre lag die Aufnahme an bodenbürtigem Stickstoff durch die Ackerbohne nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat mit 21 kg ha^{-1} signifikant unter dem Wert der Variante Grüngutkompost mit 34 kg ha^{-1} . Der prozentuale Anteil der bodenbürtigen N-Aufnahme an der Gesamtaufnahme an Stickstoff (N_{dfs}) dieser Variante unterschied sich im Mittel der Jahre jedoch nicht signifikant von den anderen Prüfgliedern (Tab. 17). Das bedeutet, dass nach mineralischer Düngung von der Ackerbohne anteilig mehr Stickstoff durch symbiotische N_2 -Fixierung gegenüber den anderen Prüfgliedern aufgenommen wurde, so dass ein Einfluss der gedüngten Nährstoffe nachzuweisen war.

Tab. 17: Einfluss der Düngung auf den Anteil an bodenbürtigem (N_{dfs}) und luftbürtigem Stickstoff (N_{dfa}) am Gesamtstickstoff im Spross der Ackerbohne, Mittelwerte der Jahre 2009 und 2010

Prüfglieder	$\text{N}_{\text{dfs}} [\%]^*$	$\text{N}_{\text{dfa}} [\%]^*$
Kontrolle	24,4 a	75,6 a
Kalk	26,4 a	73,6 a
Mineraldüngemittel	23,6 a	76,4 a
Grüngutkompost	25,3 a	74,7 a
Pferdemist	24,8 a	75,2 a
Gehölzhäcksel	23,0 a	77,0 a
Mittelwert	24,6	75,4

* gewichtete Mittelwerte der Varianten,

Tukey-Test, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Jahr

Eine anteilig oder absolut geringere N-Aufnahme aus dem Boden nach der Düngung von Gehölzhäcksel infolge der festgestellten geringeren N_{min} -Mengen im Boden 40

Tage nach der Saat der Ackerbohne und ein damit verbundener Anstieg der symbiotischen N_2 -Fixierung konnte anhand der untersuchten Parameter nicht ermittelt werden. Auch die N-Aufnahme der Referenzkultur Spitzwegerich deutet im Mittel der Jahre darauf hin, dass die N-Verfügbarkeit im Boden nach der Düngung von Gehölzhäcksel im Vergleich zur Kontrolle nicht signifikant vermindert war (Abb. 25). Nach der Düngung von Pferdemist wurde mit $99 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ von der Ackerbohne die höchste Menge an Stickstoff aus dem Boden aufgenommen, was wie auch bei Welschem Weidelgras als Referenzfrucht zur Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009 auf eine erhöhte N-Verfügbarkeit im Boden infolge einer Netto-N-Mineralisierung aus dem applizierten organischen Material hinweist.

Im Vergleich zur Ackerbohne nahm die Spross-TM des Rotklees im Mittel der Prüfglieder im Jahr 2010 um 18 % gegenüber dem Jahr 2009 in einem deutlich geringerem Umfang ab, ebenso die Menge an aufgenommenem Stickstoff mit einem Rückgang um 20 % gegenüber dem Vorjahr (Abb. 26). Dabei lag die Aufnahme an Stickstoff aus dem Boden durch den Rotklee im Jahr 2010 bei 61 kg ha^{-1} und damit um 21 % signifikant niedriger im Vergleich zum Vorjahr. Die symbiotische N_2 -Fixierung betrug im Jahr 2010 210 kg ha^{-1} und lag somit um 19 % signifikant niedriger gegenüber dem Vorjahr.

Im Mittel der Jahre wurde in allen Düngevarianten eine höhere Menge an Spross-N im Bereich zwischen 12 und 42 kg ha^{-1} gegenüber der Kontrolle ermittelt (nicht signifikant verschieden). Nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat wurde mit 321 kg ha^{-1} die höchste N-Menge im Spross des Rotklees ermittelt. Auch nach der varianzanalytischen Einzelauswertung der boden- und luftbürtigen N-Aufnahme des Rotklees zeigten sich keine signifikanten Unterschiede im Vergleich der Prüfglieder im Mittel der Jahre. Tendenziell konnte jedoch mit 40 kg ha^{-1} eine deutlich höhere Menge an symbiotisch fixiertem Stickstoff im Spross des Rotklees nach der Düngung von Dolophos / Kaliumsulfat gegenüber der Kontrolle festgestellt werden. Das bedeutet, dass die in dieser Düngevariante zugeführten Nährstoffe einen Einfluss auf die symbiotische N_2 -Fixierung hatten und durch den Rotklee somit besser genutzt werden konnten als etwa von der Saatplatterbse (vergl. Kapitel 3.1.4).

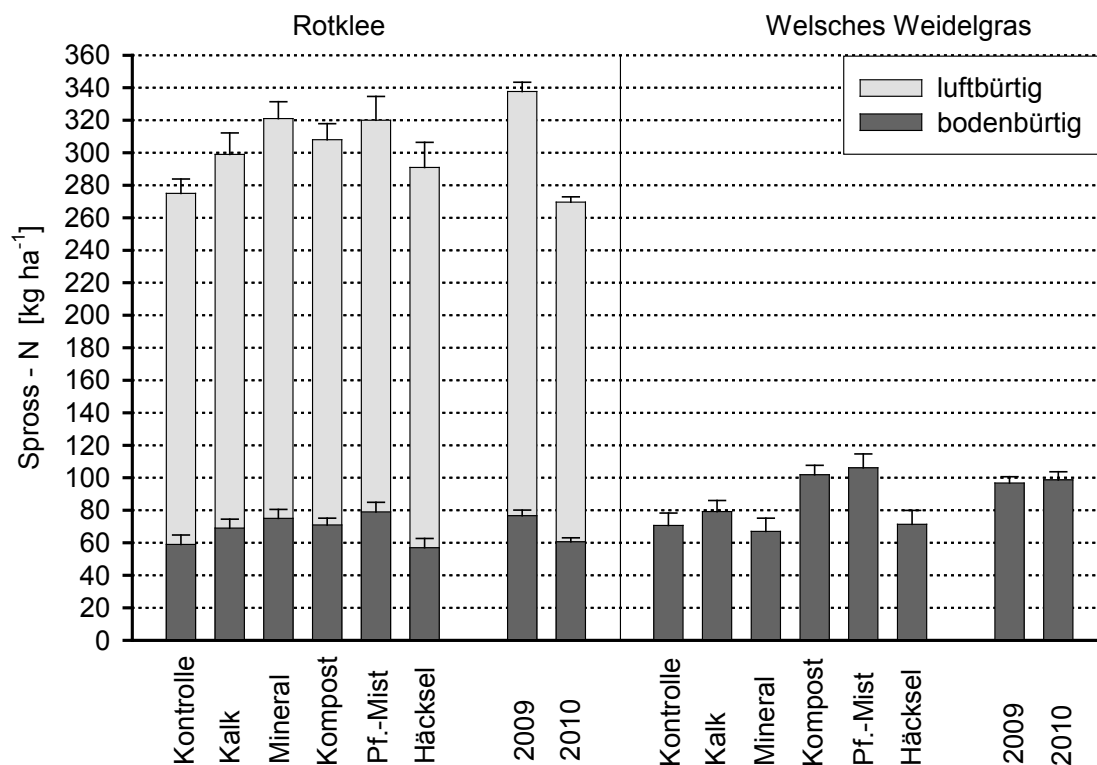


Abb. 26: Einfluss der Düngung auf die Menge an Stickstoff im Rotkreespross aus dem Boden und über symbiotische N_2 -Fixierung und auf die N-Menge im Spross von Welschem Weidelgras in den Jahren 2009 und 2010, zweifaktorielle Auswertung, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Jahr

Nach der Düngung von Gehölzhäcksel wurde im Mittel der Jahre mit 57 kg ha^{-1} die geringste Menge an Stickstoff aus dem Boden durch den Rotklee aufgenommen und der Anteil des bodenbürtigen Stickstoffs am Spross-N des Rotklee lag mit 19,6 % ebenfalls unter den Werten der anderen Prüfglieder (nicht signifikant, Tab. 18). Mit Blick auf die geringe Differenz zur Kontrolle mit einer N-Aufnahme aus dem Boden von 59 kg ha^{-1} bzw. einem bodenbürtigem Anteil an Stickstoff im Spross des Rotklee in Höhe von 21,5 % kann jedoch nicht von einer verminderten N-Verfügbarkeit im Boden aufgrund der Einarbeitung des Gehölzhäcksel mit weitem C/N-Verhältnis ausgegangen werden. Auch bei der N-Aufnahme des Welschen Weidelgrases konnten nach der Düngung von Gehölzhäcksel keine Unterschiede zur Kontrolle in der Höhe der N-Aufnahme (jeweils 71 kg ha^{-1}) festgestellt werden (Abb. 26). Hier wurde insbesondere nach der Düngung von Pferdemit (106 kg ha^{-1}) und Grüngutkompost (102 kg ha^{-1}) signifikant mehr Stickstoff gegenüber der Kontrolle und der Varianten Häcksel und Mineral im Mittel der Jahre aufgenommen.

Tab. 18: Einfluss der Düngung auf den Anteil an boden- (N_{dfs}) und luftbürtigem Stickstoff (N_{dfa}) am Gesamtstickstoff im Spross des Rotklee, Mittelwerte der Jahre 2009 und 2010

Prüfglieder	N_{dfs} [%]*	N_{dfa} [%]*
Kontrolle	21,5 a	78,5 a
Kalk	23,2 a	76,8 a
Mineraldüngemittel	23,2 a	76,8 a
Grüngutkompost	23,0 a	77,0 a
Pferdemist	24,7 a	75,3 a
Gehölzhäcksel	19,6 a	80,4 a
Mittelwert	22,5	77,5

* gewichtete Mittelwerte der Varianten,
Tukey-Test, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Jahr

Im Vergleich zum Rotklee lässt sich damit sowohl aufgrund der höheren N-Aufnahme als auch aufgrund der damit verbundenen höheren Spross-TM des Welschen Weidelgrases auf eine deutlich höhere N-Verfügbarkeit bzw. auf eine bessere Ausnutzung des verfügbaren N_{min} im Boden nach der Düngung von Pferdemist und Grüngutkompost schließen.

3.2.6 Bodenatmung in Ackerbohne

In der Ackerbohne wurden im Jahr 2009 und im Jahr 2010 Messungen zur Bodenatmung durchgeführt. Im Mittel von vier Messtagen wurden im Jahr 2009 in den Varianten Grüngutkompost mit $535 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ und Gehölzhäcksel mit $527 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ signifikant höhere Werte der Bodenatmung gegenüber der Kontrolle mit $402 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ und der Variante Mineral mit $355 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ festgestellt (Tab. 19).

Im Jahr 2010 war die Bodenatmung vor allem in den Varianten Pferdemist mit $1026 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ und Grüngutkompost mit $960 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ gegenüber der Kontrolle mit $670 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ und der Variante Mineral mit $618 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$ signifikant höher. In der Variante Mineral (Dolophos / Kaliumsulfat) wurden bei der Ackerbohne in beiden Jahren - wie auch bei Saatplatterbse im Jahr 2008 - jeweils die niedrigste Bodenatmung im Vergleich der Prüfglieder festgestellt.

Tab. 19: Mittelwerte der Bodenatmung zu 4 (2009) bzw. zu 5 (2010) Terminen in Ackerbohne nach mineralischer und organischer Düngung in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Bodenatmung * 4 Termine 2009 ↓ [mg m ⁻² h ⁻¹ CO ₂]	Bodenatmung * 5 Termine 2010 ↓ [mg m ⁻² h ⁻¹ CO ₂]
Kontrolle	402 ±27 bc	670 ±92 c
Kalk	446 ±51 abc	769 ±91 bc
Mineral	355 ±38 c	618 ±73 c
Grüngutkompost	535 ±36 a	960 ±124 ab
Pferdemist	494 ±32 ab	1026 ±102 a
Gehölzhäcksel	527 ±29 a	796 ±74 abc

↓ Leserichtung, * Daten transformiert, zweifaktorieller Tukey-Test,
keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung × Termin

Wie bei der Saatplatterbse weisen auch die erhöhten Werte der Bodenatmung in der Ackerbohne nach organischer Düngung auf eine verstärkte biologische Aktivität im Boden aufgrund der Umsetzung des eingebrachten organischen Düngemittels hin. Eine Abhängigkeit der Bodenatmung allein vom C/N-Verhältnis der organischen Düngemittel ist anhand der Ergebnisse nicht erkennbar.

3.2.7 ¹³C-Isotopensignatur in Ackerbohne und Rotklee

Wie bei der Saatplatterbse, war auch bei der Ackerbohne und bei Rotklee das Ziel der Untersuchungen, anhand der natürlich vorkommenden ¹³C-Isotope im Spross der Leguminosen und der organischen Düngemittel die Aufnahme an düngebürtigem Kohlenstoff durch die Pflanzen nachzuweisen. Die ausgebrachten organischen Düngemittel zu Ackerbohne und Rotklee wiesen jeweils im Vergleich der Jahre Schwankungen hinsichtlich ihrer δ¹³C-Werte auf. Aufgrund dessen wurden die ermittelten Werte der einzelnen Jahre varianzanalytisch getrennt verrechnet (Tab. 20).

So wurde etwa im Pferdemist im Jahr 2009 ein δ¹³C-Wert von -26,92 ‰ und im Jahr 2010 von -28,06 ‰ festgestellt. Zwischen den Düngevarianten und der Kontrolle wurden in beiden Jahren keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der δ¹³C-Werte im Spross der Ackerbohne ermittelt.

Tab. 20: $\delta^{13}\text{C}$ -Wert in den ausgebrachten Düngemitteln und Einfluss der Düngung auf den $\delta^{13}\text{C}$ -Wert in der Spross-TM der Ackerbohne

Prüfglieder	$\delta^{13}\text{C}$ -Wert [‰] 2009		$\delta^{13}\text{C}$ -Wert [‰] 2010	
	Düngemittel	Spross Ackerbohne	Düngemittel	Spross Ackerbohne
Kontrolle	-	-28,01 \pm 0,1	-	-26,50 \pm 0,1
Grüngutkompost	-27,96	-27,90 \pm 0,1	-28,19	-26,61 \pm 0,1
Pferdemist	-26,92	-28,00 \pm 0,3	-28,06	-26,58 \pm 0,1
Gehölzhäcksel	-28,15	-28,25 \pm 0,2	-27,51	-26,43 \pm 0,1
<i>P</i> -Wert Düngung*		0,5880	0,5098	

* einfaktorieller F-Test

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die ^{13}C -Isotopensignatur im Spross der Ackerbohne nicht in Abhängigkeit von der Düngung unterschied und somit eine Anreicherung des Pflanzenmaterials der organisch gedüngten Varianten an ^{13}C -Isotopen gegenüber der Kontrolle nicht entsprechend der Formel 9 (Kapitel 2.5.6) berechnet werden konnte. Zudem lagen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Düngemittel insbesondere im Jahr 2010 unter den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten im Spross der Ackerbohne. Signifikante Unterschiede im Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Spross des Rotklees wurden zwischen den Prüfgliedern im Jahr 2009 festgestellt (Tab. 21).

Tab. 21: $\delta^{13}\text{C}$ -Wert in den ausgebrachten Düngemitteln und Einfluss der Düngung auf den $\delta^{13}\text{C}$ -Wert in der Spross-TM des Rotklees

Prüfglieder	$\delta^{13}\text{C}$ -Wert [‰] 2009		$\delta^{13}\text{C}$ -Wert [‰] 2010	
	Düngemittel	Spross Rotklee	Düngemittel	Spross Rotklee
Kontrolle	-	-27,99 \pm 0,1 a	-	-28,38 \pm 0,2 a
Grüngutkompost	-27,96	-27,99 \pm 0,1 a	-28,19	-28,55 \pm 0,1 a
Pferdemist	-26,92	-28,42 \pm 0,1 b	-28,06	-28,50 \pm 0,1 a
Gehölzhäcksel	-28,15	-28,47 \pm 0,1 b	-27,51	-28,62 \pm 0,1 a

Tukey-Test, $\alpha < 0,05$

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Spross des Rotklees lagen jedoch in beiden Jahren analog zur Ackerbohne in der Kontrolle über den Werten der gedüngten Varianten. Die Unterschiede der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Spross des Rotklees und der Ackerbohne waren

zwischen der Kontrolle und den gedüngten Leguminosen jedoch so gering, dass ein düngebürtiger Anteil an Kohlenstoff im Spross der Leguminosen nicht bzw. nur mit unzureichender Schätzgenauigkeit ermittelt werden konnte.

3.2.8 Ertrag und Spross-N des Winterweizens nach Ackerbohne und Rotklee

Bei der dreifaktoriellen Varianzanalyse der Korn-TM, des Spross-N und des Rohproteingehaltes im Korn des Weizens nach Düngung, Vorfrucht und Jahr wurde jeweils eine signifikante Wechselwirkung (Vorfrucht \times Jahr) ermittelt. Daher werden diese Ergebnisse im Folgenden für die Jahre 2010 und 2011 gesondert dargestellt.

Der Kornertrag des Winterweizens nach der Vorfrucht Ackerbohne lag im Mittel der Prüfglieder im Jahr 2010 mit 37,7 dt ha⁻¹ TM signifikant um 9 % über dem Kornertrag nach der Vorfrucht Rotklee und im Jahr 2011 mit 26,2 dt ha⁻¹ TM signifikant um 20 % unter dem Kornertrag nach der Vorfrucht Rotklee (Abb. 27).

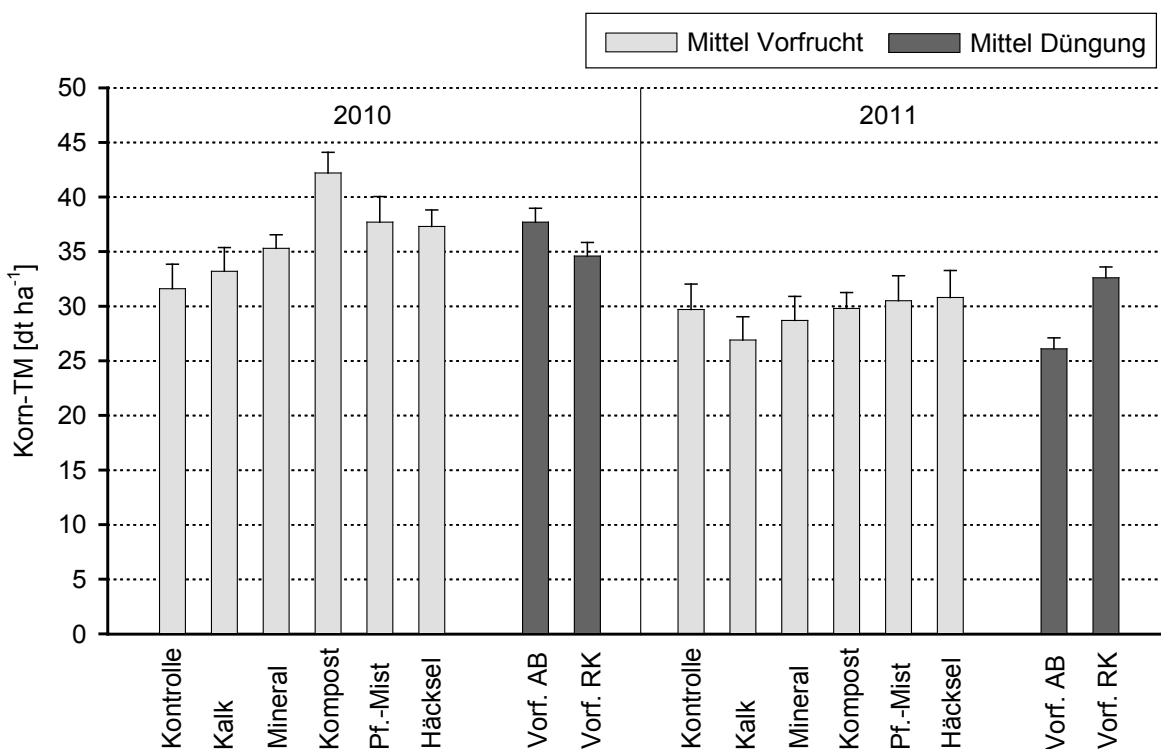


Abb. 27: Einfluss der Düngung der Vorfrucht Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) auf den Kornertrag der Folgefrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011; zweifaktoriell, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Vorfrucht

Im Mittel der Vorfrüchte wurde in den Varianten Grüngutkompost und Pferdemist im Jahr 2010 mit 42 bzw. 38 dt ha⁻¹ ein signifikant höherer Kornertrag im Vergleich zur Kontrolle (32 dt ha⁻¹) erzielt. Nach der Düngung von Gehölzhäcksel zur Vorfrucht

wurde eine Korn-TM von 37 dt ha^{-1} ermittelt. Im Jahr 2011 zeigten sich im Mittel der Vorfrüchte keine signifikanten Unterschiede im Kornertrag zwischen den Prüfgliedern. Hinsichtlich des Strohertrages wurden nach der zweifaktoriellen Auswertung keine signifikanten Unterschiede im Vergleich der Düngevarianten einschließlich der Kontrolle ohne Düngung festgestellt. Die Mittelwerte der Kornerträge des Weizens der Einzeljahre sind in Tab. A 41 und Tab. A 42 ersichtlich. Die Menge an Spross-N des Weizens und damit der Entzug an Stickstoff aus dem Boden nach den Vorfrüchten Ackerbohne und Rotklee folgte in den Jahren 2010 und 2011 im Wesentlichen der Höhe der Korn-TM (Abb. 28).

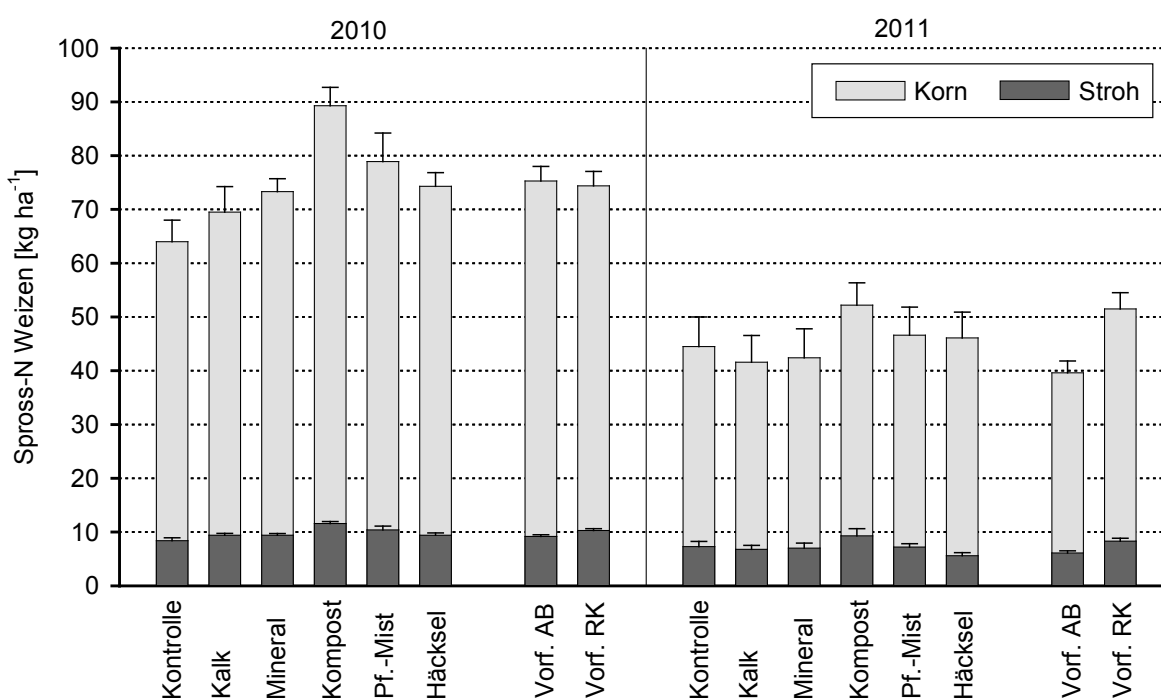


Abb. 28: Einfluss der Düngung der Vorfrüchte Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) auf die Spross-N-Menge in der Folgefrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011; zweifaktorielle Auswertung, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Vorfrucht

Die N-Akkumulation im Spross des Weizens lag im Jahr 2010 im Mittel der Prüfglieder bei 74 kg ha^{-1} , wobei 65 kg ha^{-1} mit dem Korn und 9 kg ha^{-1} mit dem Stroh entzogen wurden (Abb. 28). Im Jahr 2011 lag die N-Menge des Weizens entsprechend der geringeren Spross-TM gegenüber dem Vorjahr im Mittel der Prüfglieder insgesamt bei 46 kg ha^{-1} (38 kg ha^{-1} im Korn und 8 kg ha^{-1} im Stroh). Im Jahr 2010 lag der Spross-N des Weizens in der Variante mit der Düngung von Grüngutkompost zur Vorfrucht mit 89 kg ha^{-1} und in der Variante Pferdemist mit

79 kg ha⁻¹ signifikant über dem Wert der Kontrolle mit 64 kg ha⁻¹. Im Jahr 2011 zeigten sich keine Unterschiede der Düngevarianten gegenüber der Kontrolle hinsichtlich des Spross-N im Weizen. Die Höhe an Spross-N des Weizens im Mittel der Düngevarianten einschließlich der Kontrolle unterschied sich im Jahr 2011 nach der Vorfrucht Rotklee signifikant von der Menge nach der Vorfrucht Ackerbohne. Hinsichtlich des Rohproteingehalts im Korn des Weizens wurden in beiden Jahren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Prüfgliedern ermittelt (Abb. 29 und Tab. A 20).

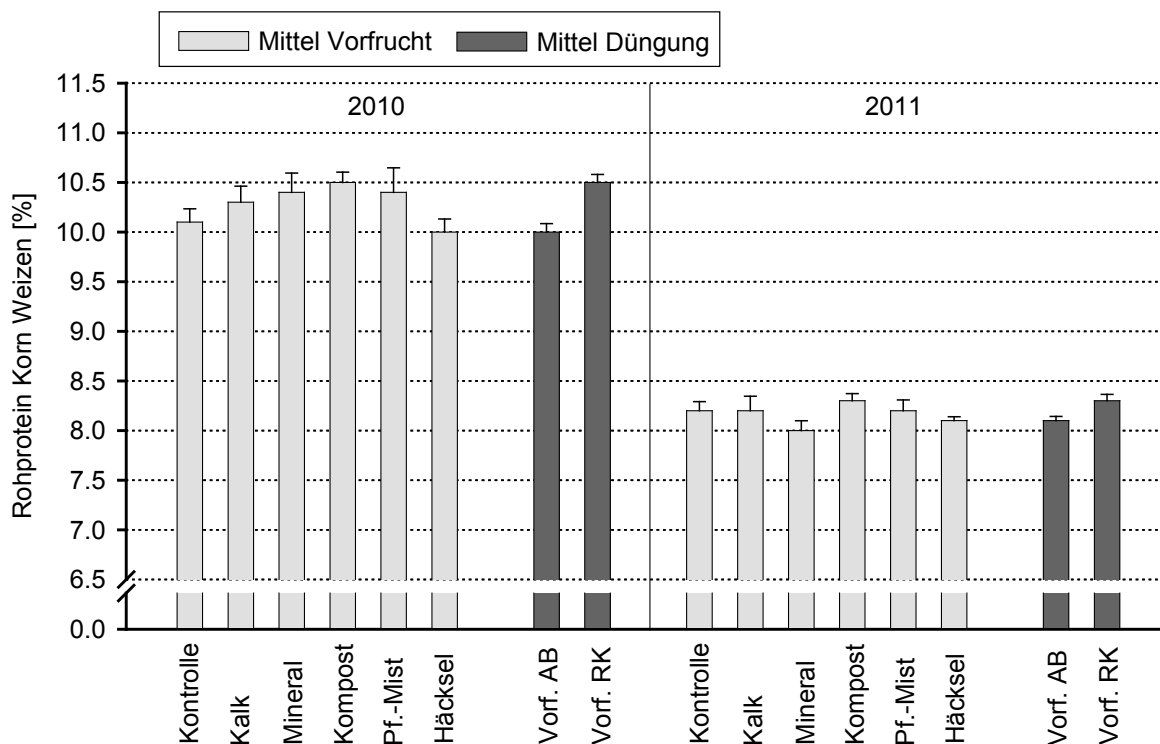


Abb. 29: Einfluss der Düngung zu Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) auf den Rohproteingehalt in der Korn-TM der Folgefrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011, zweifaktorielle Auswertung, keine signifikante Wechselwirkung Düngung × Vorfrucht

Der Rohproteingehalt im Korn des Weizens nach Vorfrucht Rotklee lag im Mittel der Prüfglieder mit 10,5 % im Jahr 2010 und mit 8,3 % im Jahr 2011 jeweils signifikant über dem Rohproteingehalt nach der Vorfrucht Ackerbohne (10,0 % im Jahr 2010 und 8,1 % im Jahr 2011). Im Jahr 2011 lag sowohl nach der Vorfrucht Ackerbohne als auch nach der Vorfrucht Rotklee der Rohproteingehalt im Korn des Weizens jeweils signifikant unter dem Wert des Vorjahres. Nach organischer Düngung zur Vorfrucht des Weizens zeigten sich gegenüber der Kontrolle im Jahr 2009

insbesondere bei Pferdemist und Grüngutkompost deutliche Effekte, wie etwa die erhöhte Spross-TM, die erhöhte Spross-N-Menge im Rotklee und die signifikant höhere N-Akkumulation im Spross des Spitzwegerichs und des Welschen Weidelgrases, welche sich vor allem auf eine erhöhte N-Verfügbarkeit im Boden in diesen Varianten zurückführen lassen. Die im Vergleich der Prüfglieder erhöhte Korn-TM und die damit verbundene erhöhte N-Menge im Spross des Weizens nach der Düngung von Grüngutkompost zur Vorfrucht weist darüber hinaus neben der festgestellten kurzfristigen Wirkung der Düngung im Jahr der Ausbringung auch auf eine mittelfristige Wirkung hin. Offenbar wurde zum Weizen im Jahr 2010 insbesondere nach der Vorfrucht Ackerbohne beständig Stickstoff aus dem Grüngutkompost im Boden verfügbar, worauf auch die erhöhten N_{\min} -Vorräte im Frühjahr 2010 nach der Vorfrucht Ackerbohne hindeuten (Abb. 17, Kapitel 3.2.3). Die N-Menge im Spross des Weizens folgte innerhalb eines Jahres im Wesentlichen der Höhe der Korn-TM. Gleichzeitig lag der Rohproteingehalt im Korn des Weizens im Mittel der Vorfrucht im Jahr 2010 in allen Düngevarianten im Bereich zwischen 10,0 und 10,5 % in der TM gegenüber dem Wert der Kontrolle mit 10,0 % in der TM, was den Effekt einer erhöhten N-Verfügbarkeit nach der Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist zur Vorfrucht bestätigt. Auch nach der Düngung von Gehölzhäcksel wurden tendenziell höhere (2010) bzw. gleich hohe Werte (2011) an Korn-TM und N-Mengen im Spross des Weizens gegenüber der Kontrolle festgestellt, was zeigt, dass nach der Applikation dieses Düngemittels keine negativen Effekte in der Folgefrucht aufgrund des weiten C/N-Verhältnisses im gedüngten Gehölzhäcksel zu verzeichnen waren. Die varianzanalytische Auswertung der einzelnen Vorfrüchte zeigte, dass der Kornertrag des Weizens nach der Düngung von Grüngutkompost gegenüber der Kontrolle vor allem nach der Vorfrucht Ackerbohne erhöht war (Tab. A 41).

Da die Werte der Korn- und Stroh-TM und des Spross-N der Ackerbohne in dieser Variante nicht bzw. nur wenig gegenüber den Vergleichsvarianten variierten (Tab. A 36 und Tab. A 39), ist davon auszugehen, dass der ermittelte Effekt auf die Nachfrucht zum größten Teil auf eine direkte Wirkung des Düngemittels selbst und weniger auf einen positiven Effekt auf die Ackerbohne zurückzuführen ist.

Der Ernteindex des Weizens lag nach dreifaktorieller Auswertung im Mittel der Vorfrucht und der Jahre in der Kontrolle ohne Düngung mit 51 % tendenziell unter den Werten der Varianten mit Düngung (Tab. 22). Das bedeutet, dass tendenziell

jede Form der Düngung zu einer Erhöhung des Ernteindex des Weizens führte. Nach der Vorfrucht Ackerbohne war mit 55 % ein signifikant höherer Ernteindex im Vergleich zur Vorfrucht Rotklee mit 52 % zu verzeichnen, was bedeutet, dass nach der Ackerbohne im Mittel der Düngevarianten einschließlich der Kontrolle insgesamt günstigere Bedingungen zur Fruchtbildung des Weizens gegeben waren und somit ein etwas besserer Vorfruchteffekt im Vergleich zum Rotklee zu verzeichnen war.

Der Ernteindex unterschied sich im Mittel der Düngung und der Vorfrucht praktisch nicht zwischen den Jahren 2010 und 2011.

Tab. 22: Einfluss von Düngung zu Ackerbohne und Rotklee, Vorfrucht und Jahr auf den Ernteindex (%) der Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011, Leserichtung ↓

Prüfglieder		Vorfrucht	Jahr	
Kontrolle	51,0 ±1,3	Ackerbohne 55,4 ±0,6	2010	53,5 ±0,7
Kalk	52,9 ±1,4	Rotklee 52,1 ±0,7	2011	54,1 ±0,8
Mineral	53,4 ±1,0			
Grüngutkompost	54,7 ±1,3			
Pferdemist	54,6 ±1,4			
Gehölzhäcksel	56,1 ±0,8			
<i>P</i> -Wert Düngung		0,7941		
<i>P</i> -Wert Vorfrucht		0,0275		
<i>P</i> -Wert Jahr		0,7236		

dreifaktorieller F-Test, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung × Vorfrucht, Düngung × Jahr, Vorfrucht × Jahr und Düngung × Vorfrucht × Jahr

Der Ernteindex des Weizens nach den Vorfrüchten Ackerbohne und Rotklee lag mit 54 % deutlich über dem Wert nach der Vorfrucht Saatplatterbse, welcher im Mittel der Jahre 2009 und 2010 43 % betrug.

3.3 Düngung von ¹⁵N- und ¹³C-markiertem Stroh zu Rotklee

3.3.1 Gefäßversuch im Gewächshaus

Im Gefäßversuch unter teilkontrollierten Bedingungen im Gewächshaus wurde im Jahr 2011 ¹⁵N- und ¹³C-markiertes Weizenstroh zu Rotklee gedüngt. Ziel war es, die

Aufnahme von Kohlenstoff aus dem eingearbeiteten Stroh durch den Rotklee zu quantifizieren. Der Nachweis von ^{15}N -Stickstoff im Spross des Rotklee sollte zeigen, in welchem Zeitraum das ^{15}N -angereicherte Stroh im Boden mikrobiell umgesetzt und der ^{15}N -Stickstoff im Gefäß pflanzenverfügbar wurde.

Der Schnittgutertrag des Rotklee in den Gefäßen zu sechs Schnittterminen nach der Düngung von doppelt-markiertem Stroh ist in Abb. 30 dargestellt. Der Schnittertrag des Rotklee nahm bis zum vierten Schnitt zu und unterschied sich zu diesem Termin signifikant vom Schnittgutertrag des ersten und fünften Termins.

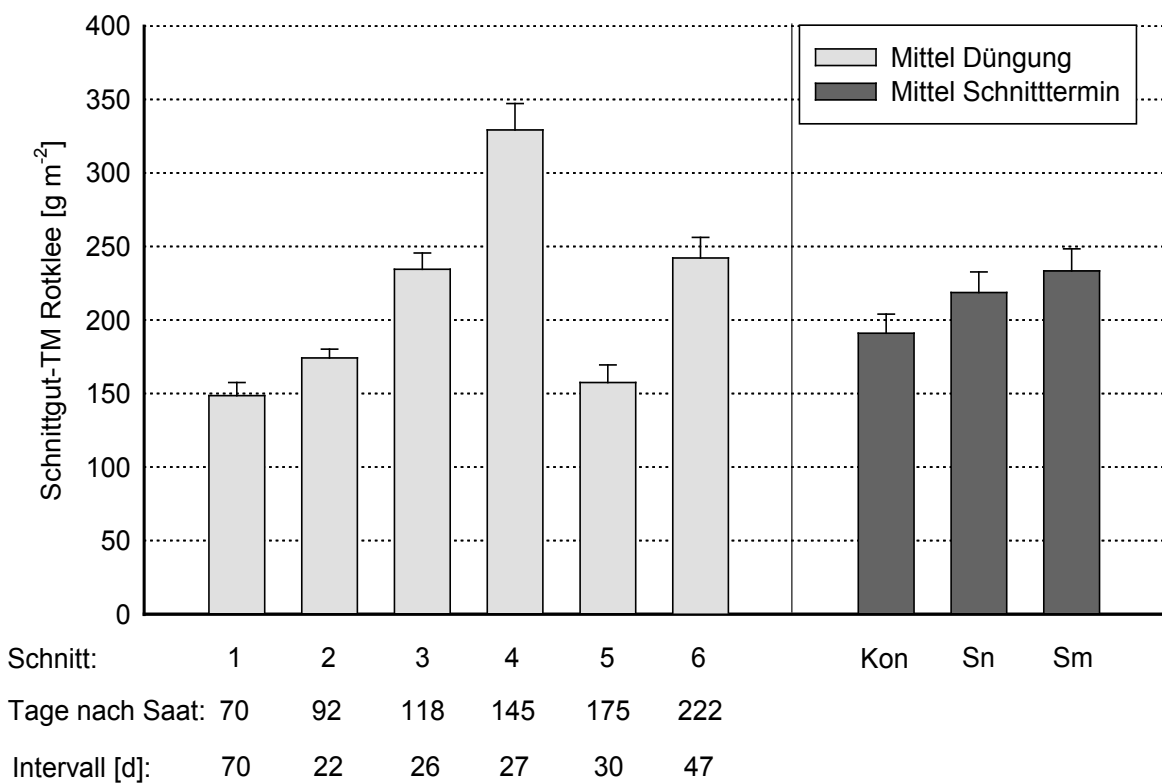


Abb. 30: Schnittgutertrag des Rotklee zu sechs Schnittterminen im Gefäßversuch nach Düngung von Stroh, zweifaktorielle Auswertung, Kon: Kontrolle ohne Düngung, Sn: Stroh - nicht markiert, Sm: Stroh - ^{15}N -markiert, keine signifikante Wechselwirkung Düngung \times Schnitttermin

Als Ursache für die geringere Schnittgutmenge zum fünften Termin, ist eine unbeabsichtigt geringere Wasserversorgung der Pflanzen im Zeitraum zwischen dem 145. und 160. Tag nach der Saat des Rotklee anzusehen. Im Mittel der Schnitte lagen die Schnittguterträge des Rotklee in beiden Varianten mit der Düngung von Stroh jeweils signifikant über dem Wert der Kontrolle (siehe auch Tab. A 45).

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross des Rotkleees stiegen nach der Düngung von markiertem Stroh mit jedem Schnitt bis auf einen Wert von + 88,2 ‰ zum sechsten Schnitt an (Abb. 31) und lagen zu jedem Schnitttermin signifikant über den Werten der Kontrolle und der Düngung mit nicht markiertem Stroh (siehe auch Tab. A 46).

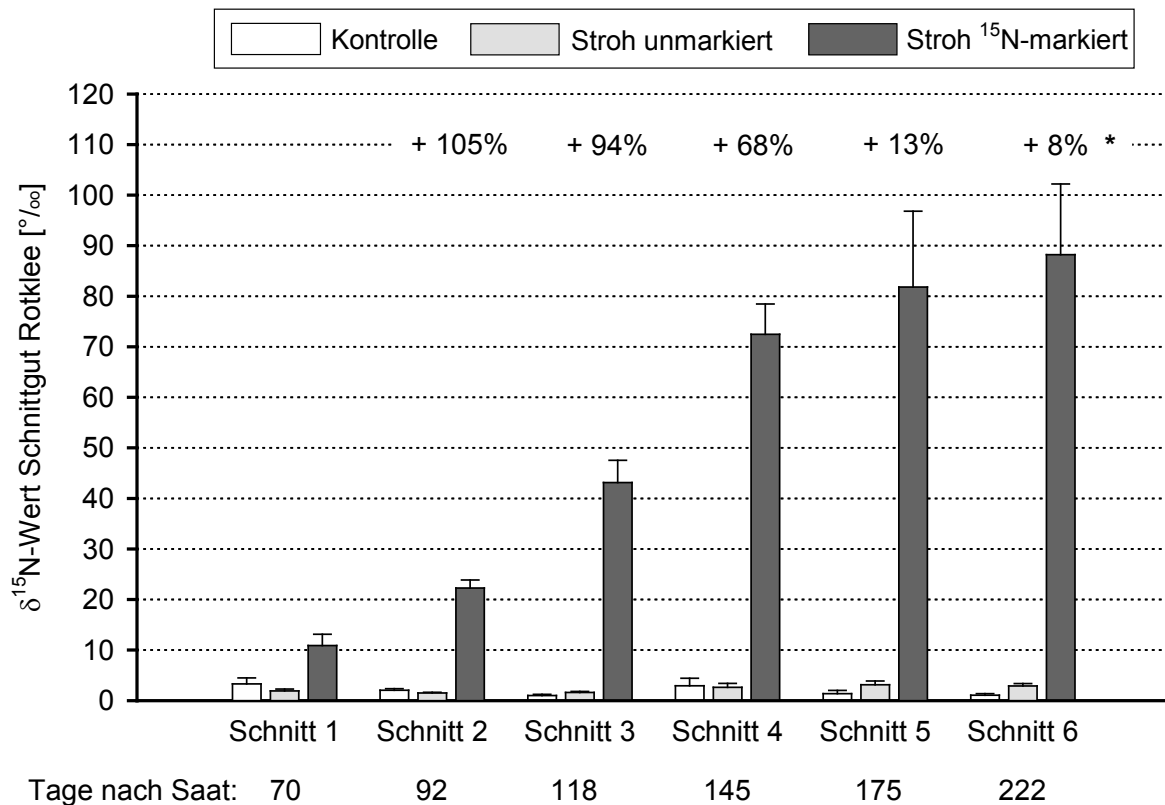


Abb. 31: Einfluss der Strohdüngung und der ^{15}N -Markierung auf den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Schnittgut des Rotkleees zu sechs Schnittterminen im Jahr 2011 ($n = 5$),
* Steigerung des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes zum jeweils vorherigen Schnitt des Rotkleees

Anhand der mit jedem Schnitt steigenden $\delta^{15}\text{N}$ -Werte kann gezeigt werden, dass der Anreicherungsgrad an ^{15}N im Schnittgut des Rotkleees kontinuierlich zunahm und der mit dem Stroh gedüngte ^{15}N -Stickstoff mit zunehmender Dauer der Vegetationszeit im Boden mineralisiert und vom Rotklee aufgenommen wurde. Daraus lässt sich ableiten, dass sowohl der Anreicherungsgrad im markierten Stroh von 3,01266 atom% ^{15}N als auch die gedüngte Menge an Stroh von 29 g FM je Gefäß als ausreichend für die hier durchgeführten Untersuchungen angesehen werden kann.

In Tab. 23 sind die berechneten Anteile des durch den Rotklee aufgenommenen Stickstoffs an der mit dem Stroh gedüngten Menge an Stickstoff für jeden Schnitt angegeben.

Tab. 23: Anteil des Stickstoffs aus dem gedüngten Stroh im Schnittgut des Rotklees und Anteil des strohbürtigen Stickstoffs am Schnittgut-N des Rotklees (Gefäßversuch im Jahr 2011)

Schnitt-Nr.	Tage nach Saat	Anteil N aus gedüngtem Stroh [%]	Kumulierter Anteil N aus gedüngtem Stroh [%]	* Anteil des gedüngten N im Schnittgut des Rotklees [%]
1	70	0,09	0,09	0,12
2	92	0,23	0,32	0,28
3	118	0,41	0,73	0,58
4	145	0,70	1,43	0,96
5	175	0,74	2,17	1,10
6	222	0,63	2,79	1,18
Mittelwert		0,47	-	0,70

* gewichtetes Mittel

Festgestellt wurde, dass mit jedem Schnitt im Mittel 0,47 % der mit dem markierten Stroh gedüngten N-Menge durch den Rotklee aufgenommen wurde. Insgesamt lag die Aufnahme des gedüngten Stickstoffs mit sechs Schnitten durch den Rotklee bei 2,79 %. Nicht berücksichtigt ist hierbei die Menge an Stickstoff in den Wurzeln des Rotklees und die im Verlaufe der Vegetation durch Rhizodeposition oder Blattfall abgegebenen N-Mengen. Der Anteil am Stickstoff im Schnittgut des Rotklees aus dem Stroh erhöhte sich mit jedem Schnitt und betrug dabei im Mittel der Schnitttermine 0,7 %. Der mit insgesamt 2,79 % vergleichsweise geringe Anteil an aufgenommenem Stickstoff aus dem gedüngten Stroh-N erscheint mit Blick auf die überwiegend luftbürtige N-Aufnahme des Rotklees und hinsichtlich der notwendigen Mineralisierung des Stroh-N (C/N-Verhältnis 56 im markierten Stroh) plausibel.

In Abb. 32 sind die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Schnittgut des Rotklees zu den einzelnen Schnittterminen im Jahr 2011 dargestellt.

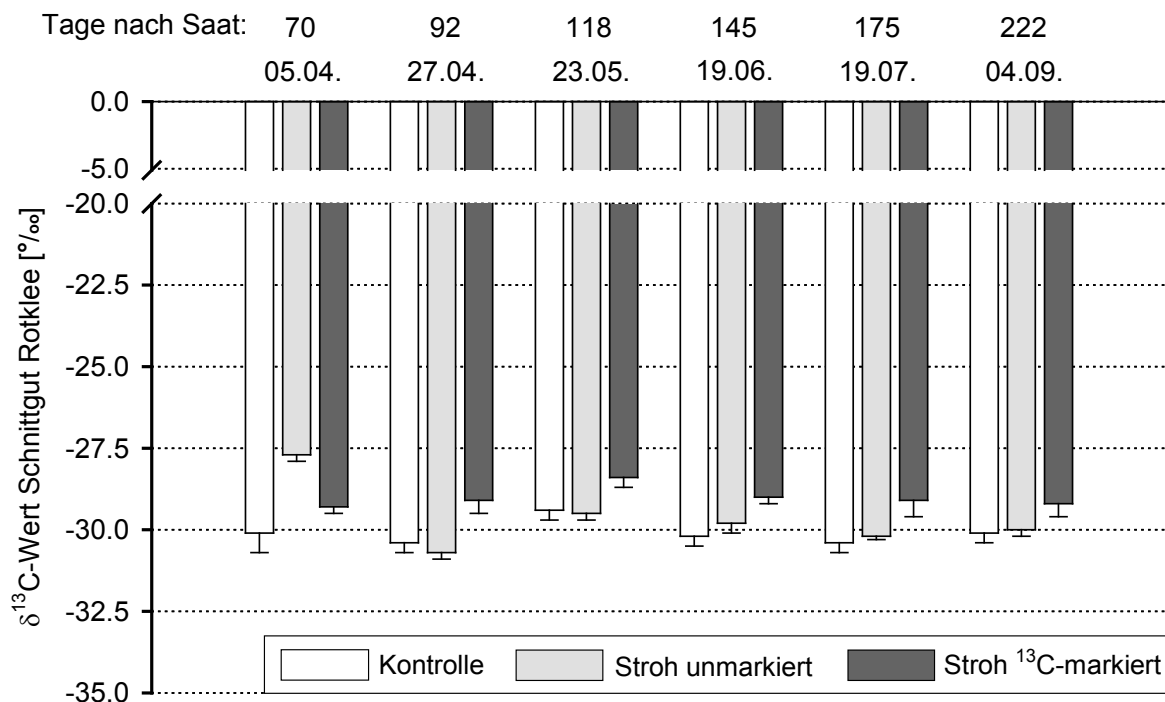


Abb. 32: $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Schnittgut des Rotklees nach Düngung mit nicht ^{13}C -markiertem und ^{13}C -markiertem Stroh zu sechs Schnittterminen im Gefäßversuch im Jahr 2011

Mit Ausnahme des ersten Schnittes lagen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in der Variante mit Düngung des ^{13}C -markierten Strohs zu allen Schnittterminen über den Werten der Kontrolle (zum vierten Schnitt signifikant) und der Variante mit nicht markiertem Stroh (zum zweiten und dritten Schnitt signifikant). Die zweifaktorielle Varianzanalyse ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten im Schnittgut des Rotklees zwischen den Terminen (Tab. 24).

Im Mittel der Termine lag der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert im Schnittgut des Rotklees der Variante mit Düngung von ^{13}C -markiertem Stroh (-29,03 ‰) signifikant über dem Wert der Kontrolle (-30,10 ‰) und über dem Wert der Variante mit nicht ^{13}C -markiertem Stroh (-30,16 ‰). Es bestanden keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen der Düngung und dem Schnitttermin. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem gegebenen Anreicherungsgrad von 1,14325 atom% ^{13}C bzw. +29,1 ‰ ^{13}C im ^{13}C -markierten Stroh ein signifikant höherer Anreicherungsgrad im Schnittgut des Rotklees erreicht werden konnte, welcher jedoch im Vergleich zur Kontrolle mit einer Differenz von 1,13 ‰ im Mittel aller Termine sehr gering ausfiel.

Tab. 24: Ergebnis der ein- und zweifaktoriellen Varianzanalyse und des multiplen Mittelwertvergleiches zum Einfluss der Strohdüngung und des Schnitttermines auf die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Schnittgut des Rotklees im Gefäßversuch

Schnitt-Nr.	Prüfglieder		
	ohne Stroh	Stroh nicht ^{13}C -markiert	Stroh ^{13}C -markiert
1	a	a	a
2	ab	b	a
3	ab	b	a
4	b	ab	a
5	a	a	a
6	a	a	a
Tukey-Test, $\alpha < 0,05$ ↑, zweifaktorieller F-Test ↓			
P-Wert Schnittermin		0,4975	
P-Wert Düngung × Schnitttermin		0,7785	

Im Vergleich dazu wurden bei der Ermittlung der natürlichen ^{13}C -Anreicherung des Rotklees in den Untersuchungen mit organischen Düngemitteln im Feld in den Jahren 2009 und 2010 Unterschiede zwischen der Kontrolle und den gedüngten Varianten im Bereich von 0,00 bis 0,48 ‰ festgestellt. Der Grad der natürlichen ^{13}C -Anreicherung der organischen Düngemittel lag im Bereich zwischen -26,92 und -28,62 ‰ und damit zu niedrig bzw. teilweise außerhalb des benötigten Wertebereiches für die Berechnung der düngebürtigen Menge an Kohlenstoff im Spross des Rotklees (vergl. Tab. 21 in Kapitel 3.2.7).

Die auf Grundlage des ^{13}C -Anreicherungsgrades (atom% ^{13}C) im Schnittgut des Rotklees berechneten Anteile an Kohlenstoff, welche aus dem gedüngten Stroh durch den Rotklee aufgenommen wurden, sind in Tab. 25 dargestellt. Analog zur geschätzten Aufnahme an Stickstoff stieg der aufgenommene Anteil an Kohlenstoff aus dem Stroh zunächst an und verringerte sich wieder ab dem vierten Termin. Im Mittel der Schnitttermine lag der Anteil an Kohlenstoff, welcher aus dem gedüngten Stroh durch den Rotklee aufgenommen wurde bei 0,62 %. Mit sechs Schnittterminen wurden insgesamt 3,71 % des mit dem Stroh gedüngten Kohlenstoffs aufgenommen. Der Anteil des strohbürtigen Kohlenstoffs im Schnittgut des Rotklees betrug im Mittel

3,03 %. Die geschätzten Werte der Kohlenstoffaufnahme über den Spross des Rotklees sind sehr niedrig.

Tab. 25: Anteil des Kohlenstoffs, der aus dem gedüngten Stroh aufgenommen wurde und Anteil an strohbürtigem Kohlenstoff am Schnittgut-C des Rotklees (Gefäßversuch im Jahr 2011)

Schnitt-Nr.	Tage nach Saat	Anteil C aus gedüngtem Stroh [%]	kumulierter Anteil C aus gedüngtem Stroh [%]	* Anteil des gedüngten C im Schnittgut des Rotklees [%]
1	70	0,52	0,52	3,66
2	92	0,70	1,22	4,15
3	118	0,73	1,96	3,13
4	145	0,68	2,64	1,95
5	175	0,55	3,19	3,13
6	222	0,52	3,71	2,15
Mittelwert		0,62	-	3,03

* gewichtetes Mittel

Demzufolge muss der Teil des Kohlenstoffs, welcher im Versuchszeitraum aus dem Stroh in Form von CO₂ freigesetzt wurde, nur einen sehr geringen Teil zur CO₂-Assimilation der Pflanzen beigetragen haben. Offenbar fand trotz der Umhausung der Gefäße mit einer transparenten PE-Folie ein weitestgehend ungehinderter Austausch mit der Umgebungsluft statt. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass den Pflanzen nach jeder Ernte für einen Zeitraum von etwa 14 Tagen nur wenig Assimilationsfläche zur Verfügung stand, um düngerbürtigen Kohlenstoff aufzunehmen. Zu berücksichtigen ist darüber hinaus eine Diskriminierung der ¹³C-Isotope im Rahmen der Photosynthese der Pflanzen, was einer Abreicherung der Sprossmasse des Rotklees und somit einer verminderten Aufnahme schwerer ¹³C-Isotope entspricht. Aufgrund der Versuchsanordnung kann eine mögliche Anreicherung von ¹³C-Kohlenstoff über die Aufnahme von organischen Kohlenstoffverbindungen über die Wurzeln des Rotklees nicht ausgeschlossen werden.

3.3.2 Gefäßversuch im Freiland

In den Jahren 2011 und 2012 erfolgte eine Düngung ^{13}C -markierten Strohs zu Rotklee in einem Feldversuch. In den Parzellen wurden Gefäße in den Boden eingelassen, in denen ^{13}C -markiertes Stroh gedüngt wurde. Die Gefäße wurden - identisch zu dem zuvor angelegten Versuch im Gewächshaus - mit einer Folie eingehaust, um Verwirbelungen der Luft möglichst gering zu halten. Ziel war es zum einen, die Bodenatmung auf den Parzellen ohne und mit Strohdüngung zu ermitteln, um festzustellen, ob im Verlauf der Vegetation des Rotklee verstärkt Kohlenstoff aus dem Boden in Form von CO_2 freigesetzt wurde. Mit der Düngung von hoch angereichertem Stroh (9,7 atom% ^{13}C) In den Gefäßen sollte die Aufnahme von strohbürtigem Kohlenstoff durch den Rotklee im Freiland quantifiziert werden.

3.3.2.1 Bodenatmung

Die Bodenatmung zur Strohdüngung des Rotklee wurde im Jahr 2011 zu acht Terminen und im Jahr 2012 zu 15 Terminen gemessen. In beiden Jahren wurde im Mittel der Termine in der Variante mit Strohdüngung eine signifikant höhere CO_2 -Entbindung aus dem Bodengegenüber der Kontrolle ohne Strohdüngung ermittelt (Tab. 26). Die Werte lagen im Jahr 2011 in der Kontrolle mit Werten zwischen 453 und 724 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$ im Mittel um 16 % unter den Werten der Variante mit Strohdüngung mit 519 bis 808 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$ (vergl. auch Tab. A 44). Im Jahr 2012 lag die Bodenatmung in der Kontrolle im Bereich zwischen 234 und 805 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$ im Mittel um 5 % über den Werten der Variante mit Strohdüngung mit 205 bis 930 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$.

Tab. 26: Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse der Bodenatmung in Rotklee nach Strohdüngung in den Jahren 2011 und 2012

Prüfglieder	Bodenatmung zu Rotklee 8 Termine 2011 [$\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$]	Bodenatmung zu Rotklee 15 Termine 2012 [$\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$]
Kontrolle	563 \pm 29 b	521 \pm 27 B
Stroh	673 \pm 34 a	547 \pm 29 A

Tukey-Test, $\alpha < 0,05$, Daten transformiert,
keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Termin

In beiden Jahren konnte anhand der Messungen gezeigt werden, dass eine erhöhte Entbindung von CO_2 aus dem Boden nach der Düngung des Strohs erfolgte. Als Ursache kann vor allem der biologische Abbau des flach eingearbeiteten Strohs im Boden angenommen werden.

3.3.2.2 Aufnahme von markiertem ^{13}C -Kohlenstoff

Der Schnittgutertrag (Trockenmasse) des Rotklees in den Gefäßen lag zu den einzelnen Terminen im Bereich zwischen 184 und 249 g m^{-2} im Jahr 2011 und zwischen 115 und 317 g m^{-2} im Jahr 2012 (Abb. 33).

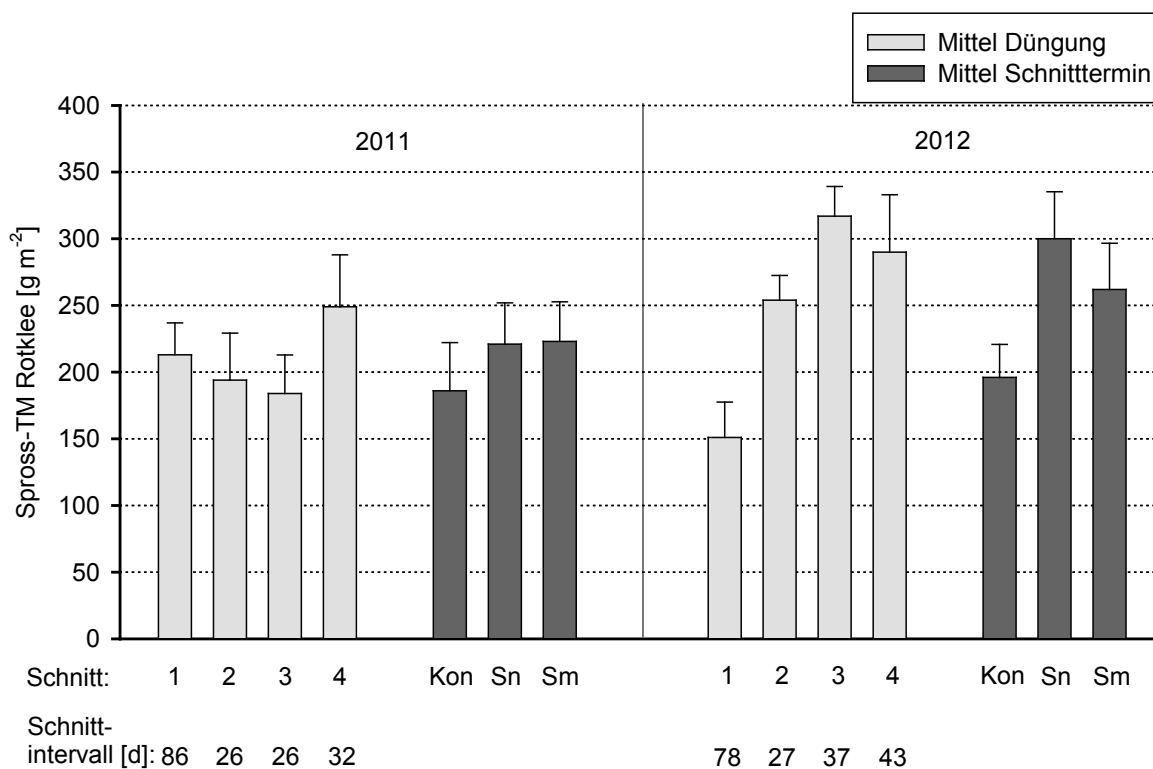


Abb. 33: Schnittgutertrag des Rotklees zu vier Schnittterminen im Gefäßversuch nach Düngung von Stroh im Freiland, zweifaktorielle Auswertung, Kon: Kontrolle ohne Düngung, Sn: Stroh - nicht markiert, Sm: Stroh - ^{13}C -markiert, keine signifikante Wechselwirkung Termin \times Düngung

Zum ersten Schnitttermin im Jahr 2012 wurde ein signifikant geringerer Schnittgutertrag als im Jahr 2011 ermittelt. Damit lag der Schnittgutertrag des Rotklees hinsichtlich der Höhe der einzelnen Schnitterträge auf dem Niveau des Gefäßversuches im Gewächshaus im Jahr 2011 mit 149 bis 329 g m^{-2} . Nach 170 bzw. 185 Vegetationstagen und vier Schnittterminen betrug die Jahresschnittgut-TM

des Rotklees 840 g m^{-2} im Jahr 2011 bzw. 1012 g m^{-2} im Jahr 2012 gegenüber der Summe von 1287 g m^{-2} im Gewächshaus im Jahr 2011 mit sechs Schnitten. Der Schnittgutertrag des Rotklees lag im Mittel der vier Schnitttermine in beiden Jahren nach Strohdüngung über dem Wert der ungedüngten Kontrolle, jedoch waren diese Unterschiede nicht signifikant.

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Spross des Rotklees zeigten in den Jahren 2011 und 2012 zu allen Ernteterminen hoch signifikante Unterschiede zwischen der Variante mit Düngung von ^{13}C -markiertem Stroh gegenüber der Kontrolle und der Variante mit Düngung von nicht ^{13}C -markiertem Stroh (Abb. 34, Tab. A 47).

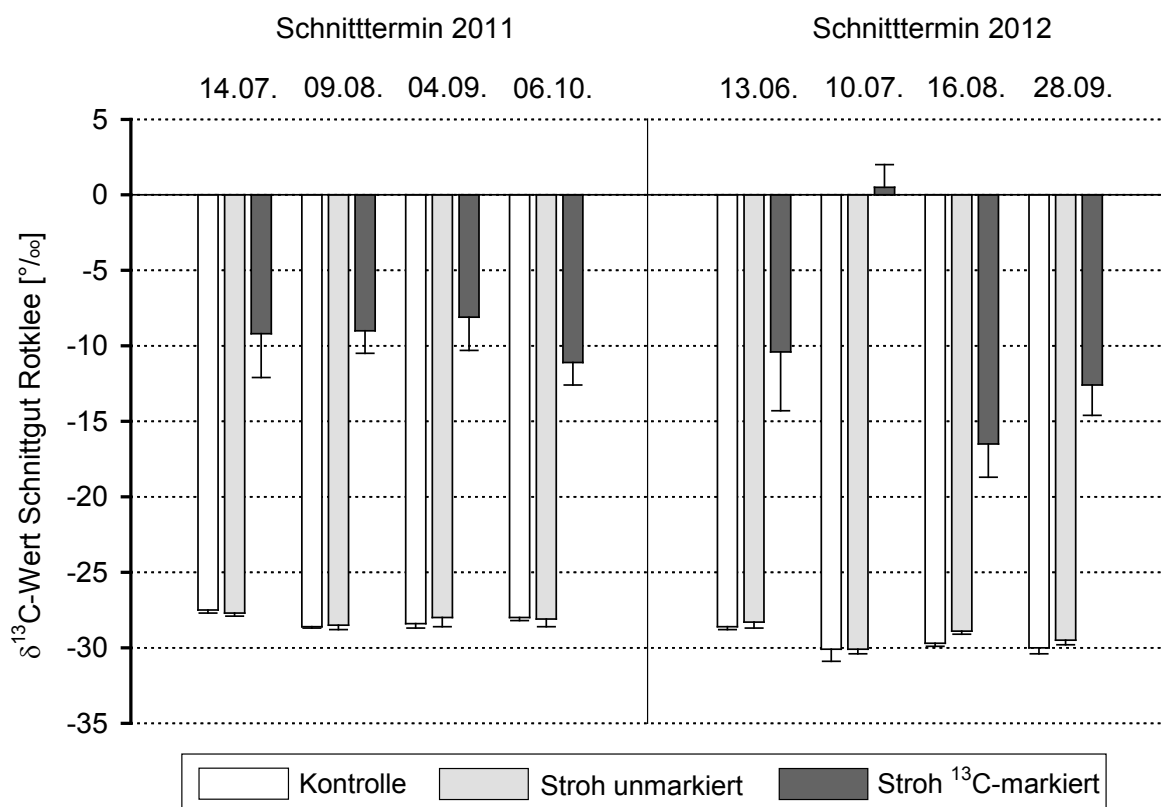


Abb. 34: $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Schnittgut des Rotklees nach Düngung mit nicht ^{13}C -markiertem und ^{13}C -markiertem Stroh zu vier Schnittterminen im Freiland in den Jahren 2011 und 2012

So lagen die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in der mit markiertem Stroh gedüngten Variante im Bereich zwischen $-16,5$ und $+0,5$ ‰, was eine erhöhte Aufnahme an ^{13}C -Kohlenstoff durch den Rotklee gegenüber den Vergleichsvarianten erkennen lässt. Auch im Vergleich zum Gefäßversuch im Gewächshaus (Abb. 32), in welchem mit einem deutlich niedrigeren Anreicherungsgrad an ^{13}C im gedüngten Stroh gearbeitet wurde, konnte

mit der Düngung des hoch angereicherten Stroh ein sichtbar besserer Tracer-Effekt erzielt werden.

Der berechnete Anteil an Kohlenstoff aus dem gedüngten Stroh im Spross des Rotklees lag mit 0,45 % im Jahr 2011 und mit 0,53 % im Jahr 2012 jeweils deutlich unter dem Wert von 3,71 % im Gefäßversuch, welcher im Gewächshaus unter teilkontrollierten Bedingungen ermittelt wurde (Tab. 27). Noch deutlicher wurde der Unterschied zwischen den beiden Gefäßversuchen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden des gedüngten Stroh hinsichtlich des Anteils an strohbürtigem Kohlenstoff am Schnittgut-C des Rotklees. Unter teilkontrollierten Bedingungen im Gewächshaus wurde im Mittel von sechs Schnittterminen ein Anteil von 3,03 % des Kohlenstoffs aus dem gedüngten Stroh am Spross-C des Rotklees ermittelt.

Unter Freilandbedingungen - mit Einschränkung der Umhausung der Gefäße zur Verminderung des Windeinflusses - betrug der Anteil im Mittel von vier Schnittterminen in beiden Versuchsjahren nur 0,25 %.

Tab. 27: Anteil an Kohlenstoff aus dem gedüngten Stroh im Schnittgut des Rotklees und Anteil von strohbürtigem Kohlenstoff am Kohlenstoff im Schnittgut des Rotklees im Jahr 2011 und 2012, Gefäßversuch im Freiland

Schnitt-Nr. 2011	Tage nach Saat	Anteil C aus Stroh [%]	Kumulierter Anteil C aus gedüngtem Stroh [%]	* Anteil des gedüngten C am Schnittgut-C des Rotklees [%]
1	86	0,12	0,12	0,22
2	112	0,10	0,22	0,25
3	138	0,13	0,35	0,32
4	170	0,10	0,45	0,23
Mittelwert		0,11	-	0,25
2012				
1	78	0,06	0,06	0,21
2	105	0,23	0,29	0,38
3	142	0,11	0,40	0,15
4	185	0,13	0,53	0,20
Mittelwert		0,13	-	0,24

* gewichtetes Mittel

Trotz einer deutlich höheren ^{13}C -Markierung des gedüngten Strohs gegenüber den Bedingungen im Gefäßversuch im Gewächshaus wurde mit 0,45 bzw. 0,53 % nur ein sehr geringer Teil des gedüngten Kohlenstoffs im Rotklee nachgewiesen. Die Messungen der Bodenatmung weisen darauf hin, dass ein Teil des Kohlenstoffs im Vegetationszeitraum aus dem Stroh veratmet bzw. in Form von CO_2 an die Atmosphäre abgegeben wurde. Daher muss davon ausgegangen werden, dass neben den bereits genannten Störgrößen vor allem ein starker Einfluss des Windes im Freiland, verbunden mit einer geringen Verweildauer des austretenden Boden- CO_2 im Bereich der Sprossmasse des Rotklees, die Assimilation von ^{13}C -Kohlenstoff stark eingeschränkt hat. Inwieweit die Aufnahme von strohbürtigem Kohlenstoff durch den Rotklee zu einer erhöhten Nettoassimilation und damit zu einer erhöhten Bildung an Spross-TM im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle führte, kann anhand der angewandten Methodik nicht eindeutig bestimmt werden.

4 Diskussion

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Ergebnisse sind gekennzeichnet durch teils statistisch gesicherte Effekte (z.B. N-Immobilisierung im Boden, erhöhte Bodenatmung), welche sich auf die Ausbringung der eingesetzten organischen Düngemittel zurückführen lassen. Gleichzeitig wird jedoch auch der Einfluss des Witterungsverlaufes in den einzelnen Jahren (Jahreseffekt) auf die Wirksamkeit der durchgeführten Düngung ersichtlich (z.B. Vorfruchtwirkung der Ackerbohne und des Rotklees, Nährstoffaufnahme der untersuchten Leguminosen). Dieses zeigt die Schwierigkeit des Nachweises reproduzierbarer kurzfristiger Wirkungen der unter den Bedingungen im Freiland geprüften Düngemittel auf.

Um die erzielten und dargestellten Ergebnisse hinsichtlich der in der Einleitung der Arbeit formulierten Hypothesen bzw. Fragestellungen einzuordnen, erfolgt die Diskussion anhand der folgenden Schwerpunkte:

- Aufnahme, Ausnutzung und Effekte der mit den Düngemitteln ausgebrachten Nährstoffe Kalium, Phosphor, Schwefel und Molybdän,
- Wirkung des organisch gebundenen Kohlen- und Stickstoffs in den Düngemitteln auf Boden und Pflanze,
- Aufnahme an dünggebürtigem Kohlenstoff durch Rotklee und
- Tracer-basierte Methodik zum Nachweis der Kohlenstoff-Aufnahme aus gedüngtem Stroh.

4.1 Verfügbarkeit von Kalium, Phosphor, Schwefel und Molybdän nach organischer Düngung

Ein Ziel der Arbeit war es zu prüfen, in welchem Umfang Nährstoffe aus den eingesetzten organischen Düngemitteln kurzfristig für die untersuchten Leguminosen verfügbar werden. Als verfügbar gilt im Allgemeinen die Anwesenheit eines Nährstoffes in absorbierbarer Form (Ionenform) in der Bodenlösung (BARBER 1995). Als Indikator zur Einschätzung der Verfügbarkeit der genannten Nährstoffe nach erfolgter Düngung wurde unter Berücksichtigung der Nährstoffentzüge die Nährstoffkonzentration (Gehalt) im Spross (bei Saatplatterbse und Rotklee) bzw. im Blatt (bei Ackerbohne) genutzt.

Mit Blick auf unterschiedliche chemische und physikalische Abläufe des Übergangs von Nährstoffen aus dem Boden und den eingesetzten organischen Düngemitteln in die Bodenlösung (COREY 1990) wurden beispielhaft die Makronährstoffe Kalium,

Phosphor, Schwefel und der Mikronährstoff Molybdän im Pflanzenmaterial analysiert und dargestellt. Da die verwendeten organischen Düngemittel mit einem Kohlenstoff-Äquivalent von $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$ ausgebracht wurden, ergaben sich zwangsläufig unterschiedliche Mengen an Nährstoffen, so dass die Diskussion der Ergebnisse bzw. der direkte Vergleich der einzelnen Düngemittel hinsichtlich einer erhöhten Verfügbarkeit an Nährstoffen vor diesem Hintergrund erfolgen musste.

Komposte als Düngemittel aus den verschiedensten Ausgangsstoffen waren in den letzten Jahrzehnten aus unterschiedlichen Blickwinkeln Gegenstand der landwirtschaftlichen Forschung von Organisationen und Verbänden in Deutschland (z.B. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V.), geförderten Projekten und Einzelautoren. Die Untersuchungen umfassten umfänglich Kompostierungsprozesse und die daraus resultierenden Eigenschaften der entstandenen Düngemittel (GARCIA et al. 1991, BERNAL et al. 1998, BRANDT & WILDHAGEN 1999), die Nährstofffreisetzung- und -aufnahme im Gewächshaus und im Feld (KEELING et al. 1995, KEELING et al. 2003, PERNER et al. 2007), suppressive Effekte auf Phytopathogene (z.B. SCHÜLER et al. 1989a, SCHÜLER et al. 1989b, WELTZIEN 1989, BRUNS et al. 1993) sowie Wirkungen des Komposteinsatzes in bodenlosen Bewirtschaftungssystemen in Bereichen des Gartenbaus (z.B. GARCIA-GOMEZ et al. 2002). Daher können die Effekte der Kompostdüngung in den eigenen Untersuchungen als „Vergleichsgröße“ gegenüber den anderen eingesetzten organischen Düngemitteln genutzt werden.

Kalium

Die Nährstoffgehalte in den verschiedenen Pflanzenteilen (Blatt, Stängel, Wurzel) sind in ihrer Höhe jeweils unterschiedlich stark beeinflusst von Art, Standort und Entwicklungsstadium der Pflanze (TYLER et al. 1962, MUNSON & NELSON 1990) und werden für den jeweiligen Status der Versorgung (Mangel, Optimum und Überschuss) mit teils hoher Variabilität angegeben (z.B. MUNSON 1998, MENGEL 2007). So geht etwa MENGEL (1991) allgemein von einem Gehalt an Kalium von 1,5 % in der Blatt-TM aus, unterhalb dessen ein K-Mangel angenommen werden kann. MC NAUGHT (1957) gibt für Kalium eine Untergrenze von 0,7 % in der TM (sichtbare K-Mangelsymptome) bzw. von 1,8 % in der TM (ausreichend hohe K-Verfügbarkeit) ermittelt am Blatt von Weißklee und Rotklee an. KOVACEVIC & VUKADINOVIC (1992) ermittelten bei einem sehr hohen Kaliumdüngungsniveau Gehalte zwischen 1,7 und 2,2 % in der TM im Blatt der Sojabohne. In Tab. 28 sind

die ermittelten Gehalte an Kalium der eigenen Untersuchungen im Spross, Blatt und im Schnittgut der geprüften Leguminosen in den Jahren 2008 bis 2010 in der Kontrolle den jeweils höchsten ermittelten K-Gehalten gegenübergestellt.

Tab. 28: Gehalt an Kalium im Spross von Saatplatterbse, im Blatt von Ackerbohne, im Schnittgut von Rotklee des ersten Schnittes und im Spross von Rotklee in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 bis 2010

Kultur / Jahr	Kalium-Gehalt in der Kontrolle [%]	Höchster Kalium-Gehalt [%]
Saatplatterbse 2008	2,6	3,1 / Pferdemist
Saatplatterbse 2009	1,7	2,4 / Pferdemist *
Ackerbohne 2009	1,8	2,4 / Mineral *
Ackerbohne 2010	1,9	3,4 / Grüngutkompost *
Rotklee 2009 (1.Schnitt)	3,2	4,2 / Mineral *
Rotklee 2010 (1. Schnitt)	2,9	4,4 / Grüngutkompost *
Rotklee 2009 (Gesamt)	3,1	3,7 / Mineral
Rotklee 2010 (Gesamt)	3,0	4,0 / Grüngutkompost *

* Unterschied gegenüber der Kontrolle signifikant mit $\alpha < 0,05$ (Tukey-Test)

Demzufolge wurde durch die Ackerbohne ohne Düngung in beiden Versuchsjahren am wenigsten Kalium aufgenommen. Die K-Gehalte im Blatt der Ackerbohne zum Zeitpunkt der Blüte (2009) und gegen Ende der Blüte (2010) betrugen nur 1,8 bzw. 1,9 % der TM. Nach BERGMANN (1993) liegen die K-Gehalte im Blatt der Ackerbohne (jüngstes entfaltetes Blatt zum Zeitpunkt der Blüte) bei ausreichender Verfügbarkeit im Boden im Bereich zwischen 2,1 und 2,8 % der TM. Das bedeutet, dass trotz des jeweils vor der Saat der Leguminosen ermittelten und als hoch eingestuften K-Gehaltes des Bodens im Bereich von 13,6 bis 16,7 mg je 100 g Boden am Versuchsstandort (LFL 2008, siehe auch Tab. 2) bei der Ackerbohne nur zu einer vergleichsweise niedrigen Aufnahme an Kalium in der Kontrolle führte. Möglich ist, dass die Verfügbarkeit des Kaliums im Boden in diesem Prüfglied durch die geringe Niederschlagshöhe im Zeitraum Januar bis April in den Jahren 2009 und 2010 für die Ackerbohne eingeschränkt war. Aus den Arbeiten von BARBER et al. (1963) und STREBEL & DUYNISVELD (1989) geht hervor, dass Kalium im Boden überwiegend durch Diffusion an die Wurzel gelangt, auf Böden mit sehr geringem Tonanteil aufgrund der geringen Bindungsmöglichkeit des K^+ -Ions auch durch

Massenfluss. Durch einen abnehmenden Bodenwassergehalt - z.B. infolge einer geringen Niederschlagshöhe über einen längeren Zeitraum - sinkt nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2010) die Diffusionsrate in der Bodenlösung deutlich, was mit einer verringerten Mobilität des Kaliums im Boden verbunden ist. Die erkennbare Limitierung der K-Aufnahme durch die Ackerbohne ohne Düngung wurde in dieser Form bei der Saatplatterbse (mit Ausnahme des Jahres 2009) und beim Rotklee nicht festgestellt. Vor allem in der TM des Rotkleees wurden in beiden Jahren auch ohne Düngung vergleichsweise hohe K-Gehalte ermittelt. Möglicherweise könnte neben der längeren Vegetationszeit des Rotkleees auch die Wurzelmorphologie der untersuchten Leguminosen ein unterschiedlich hohes Kalium-Aneignungsvermögen - vor allem bei Bedingungen, welche für die Kaliumverfügbarkeit im Boden ungünstig sind - zur Folge haben. CLAASSEN & JUNGK (1984) wiesen in ihren Untersuchungen mit Kulturen unterschiedlicher Wurzelmorphologie (u. A. Raps, Mais und Weidelgras) nach, dass mit abnehmender Mobilität von Nährstoffen im Boden die Bedeutung spezifischer Parameter wie z.B. das Spross / Wurzel-Verhältnis und die Wurzelhaarlänge zunehmen. Demnach war vor allem das homorhize Wurzelsystem des Weidelgrases besser in der Lage, auch bei geringem K-Angebot hohe K-Gehalte im Spross zu gewährleisten als dies z.B. bei Raps mit einem allorhizen Wurzelsystem der Fall war. MENGEL & STEFFENS (1985) ermittelten ein höheres K-Aneignungsvermögen von Deutschem Weidelgras gegenüber Rotklee und führten dies auf die vierfach größere Wurzellänge und auf die doppelt so große Wurzeloberfläche des Weidelgrases nach 118 Vegetationstagen zurück. HEERAMAN & JUMA (1993) wiesen in ihren Untersuchungen eine bis zu dreifach höhere Wurzellänge von Sommergerste gegenüber Ackerbohne nach.

Die Fixierung von Kalium im Boden und ein damit einhergehender größerer Einfluss auf die K-Verfügbarkeit ist aufgrund des geringen Tonanteils des Bodens am Standort Dresden-Pillnitz von ca. 10 % im Ap-Horizont nicht anzunehmen (siehe auch Tab. 1). Dies ist vor allem auf Böden mit einem Tonanteil von > 35 % zu erwarten, deren vorherrschendes Tonmineral das K-fixierende Illit und dessen Verwitterungsprodukte darstellt (NIEDERBUDDE 1965, AMBERGER et al. 1974, AUERSWALD et al. 1992).

Wie Tab. 28 verdeutlicht, wurden nach Ausbringung von Pferdemist zu Saatplatterbse und von Kaliumsulfat und Grüngutkompost zu Ackerbohne und Rotklee die jeweils höchsten K-Gehalte ermittelt. Das lässt einerseits eine

Düngerwirkung trotz ausreichend hoher Nährstoffgehalte im Boden erkennen, zeigt aber auch die Abhängigkeit der ermittelten Gehalte im Pflanzenmaterial vom Jahreseffekt (Witterungsverlauf) und zum Teil von den Untersuchungsbedingungen selbst (Standort).

Hervorzuheben ist die signifikante Erhöhung des K-Gehaltes im Schnittgut und im Spross des Rotklee in beiden Versuchsjahren nach der Düngung von Kaliumsulfat im Jahr 2009 und von Grüngutkompost im Jahr 2010 trotz offenbar guter K-Verfügbarkeit in der Kontrolle (Tab. 28). Die K-Gehalte im Schnittgut des Rotklee des ersten Schnittes im Bereich von 4,2 bis 4,4 % der TM und in der Mischprobe des Gesamtsprossertrages eines Jahres im Bereich von 3,7 bis 4,0 % der TM nach der Düngung von Kaliumsulfat und Grüngutkompost weisen im Vergleich zu den Angaben von BERGMANN (1993) zum einen auf eine Überversorgung an Kalium hin und lassen die Unterschiede der Nährstoffgehalte in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums der Pflanzen klar erkennen.

Insbesondere bei hohen Mengen an Kalium, welche mit den eingesetzten Grüngutkomposten ausgebracht wurden (z.B. 604 kg ha⁻¹ K zur Saatplatterbse im Jahr 2008 und 569 kg ha⁻¹ K zu Ackerbohne und Rotklee im Jahr 2010) zeigten sich signifikant höhere Gehalte und Entzüge an Kalium in diesem Prüfglied auch gegenüber der Variante mit Düngung von Kaliumsulfat. Da das Kalium aus Kaliumsulfat aufgrund seiner guten Löslichkeit in Wasser als sehr schnell pflanzenverfügbar gilt (MENGEL 1991, SCHILLING 2000, SCHUBERT 2006), kann demzufolge auch bei Grüngutkompost von einer hohen Verfügbarkeit des im Material enthaltenen Kaliums für die Pflanzen ausgegangen werden. Die Verfügbarkeit des Kaliums aus Komposten ist dabei abhängig vom Gesamtgehalt und vom Anteil der wasserlöslichen Fraktion am Gesamtgehalt. Diese wird in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial mit Werten zwischen 56 % und 73 % (HEET al. 2001) bzw. 85 % (VOGTMANN et al. 1993) als sehr hoch eingeschätzt. Eine rasche Kaliumverfügbarkeit aus Grüngut- und Bioabfallkomposten wird auch in anderen Untersuchungen bestätigt. Eine Verdopplung der Kaliumverfügbarkeit im Boden nach der Applikation von Grüngutkompost (Ausbringmenge 90 dt ha⁻¹ TM, C/N-Verhältnis 11,7) ermittelten z.B. LIU et al. 2012. SOUMARÉ et al. (2003) stellten im Gefäßversuch mit Bioabfallkompost (Ausbringmenge Äquivalent von 260 kg ha⁻¹ verfügbares K, C/N-Verhältnis 16,2) nach 58 Tagen Vegetationszeit signifikant höhere Kaliumgehalte im Spross von Deutschem Weidelgras fest. NISHANT & BISWAS (2008) wiesen in

Gefäßversuchen eine rasche und hohe Freisetzung von Kalium aus Reisstrohkompst bereits innerhalb von vier Tagen nach, während die Freisetzung an wasserlöslichem Phosphor erst nach zehn Tagen die höchste Verfügbarkeit erreichte. Langfristig kann in Abhängigkeit vom K-Gehalt im Boden mit jährlichen Ausbringungsmengen in Höhe von etwa 20 bis 30 t ha⁻¹ TM Grüngutkompost (entspricht 200 bis 300 kg ha⁻¹ K) von einer stabilen K-Versorgung der angebauten Kulturen ausgegangen werden (LTZ AUGUSTENBERG 2008). Die bei den eingesetzten Grüngutkomposten in den eigenen Untersuchungen ermittelte hohe Streubreite der Gesamt - Kaliumgehalte im Bereich zwischen 0,7 und 1,3 % der TM - dies gilt auch für alle weiteren erfassten Nährstoffe - wird auch durch die Ergebnisse anderer Autoren bestätigt. Demnach wiesen vor allem Grüngutkomposte in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials (jahreszeitlich unterschiedliche Anteile verholzter und grüner Pflanzenteile) eine große Variabilität auf und lagen zwischen 0,4 und 1,5 % der TM (SAGER 2007, HARGREAVES et al. 2008, BOLDRIN & CRISTENSEN 2010). GOTTSCHALL & BIDLINGMAIER (2000) geben für Bioabfallkomposte tendenziell höhere K-Gehalte von etwa 1,1 % der TM und für Grüngutkomposte eher niedrigere K-Gehalte von etwa 0,7 % der TM an. KEHRES (1995) stuft Komposte mit einem Gesamt-Kaliumgehalt von insgesamt > 0,83 % der TM als nährstoffreich ein, darunter liegende Gehalte hingegen als nährstoffarm.

Im Jahr 2009, in welchem mit Kaliumsulfat (399 kg ha⁻¹ K), Grüngutkompost (394 kg ha⁻¹ K) und Pferdemist (413 kg ha⁻¹ K) etwa gleich hohe Mengen an Kalium zu Ackerbohne und Rotklee gedüngt wurden, konnte bei vergleichbar hohen K-Gehalten im Spross des Rotklees ein erhöhter Entzug an Kalium vor allem nach der Düngung von Pferdemist und Kaliumsulfat festgestellt werden. Die K-Gehalte im Spross des Rotklees lagen in diesem Jahr nach der Düngung von Grüngutkompost hingegen um 17 % und der Entzug von Kalium um 24 % unter den Werten der Variante mit Düngung von Pferdemist (Tab. A 31 und Tab. A 33). Zudem lag die Ausnutzung des gedüngten Kaliums durch den Rotklee im Mittel der Jahre mit 24 % in der Variante Pferdemist jeweils deutlich über dem Wert der Düngung von Grüngutkompost mit 16 % (Tab. 16). Das bedeutet, dass in den eigenen Untersuchungen vor dem Hintergrund der in der Literatur angegebenen hohen K-Verfügbarkeit aus Grüngutkompost der Pferdemist eine sehr hohe Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Kaliums aufwies. Da die Funktion des Kaliums in der Pflanze fast ausschließlich an seine Ionenform gebunden ist und das Element daher in

Phloem, Xylem und in den Zellen selbst als freies Ion vorliegt (MENGEL 1991, CAMPBELL & REECE 2003, MENGEL 2007), ist die Freisetzung des Kaliums im Boden somit weitestgehend unabhängig von der Stufe des biologischen Abbaus der eingebrachten organischen Substanz (SCHILLING 2000). Die Kaliumgehalte in den eigenen Untersuchungen in der TM von Pferdemist erreichten mit 1,6 bis 3,3 % der TM etwa den 1,5 bis 4-fachen Gehalt der eingesetzten Grüngutkomposte (0,7 bis 1,3 %). DÖHLER (2005) gibt für frischen Pferdemist Kaliumgehalte zwischen 1,9 und 2,6 % in der TM an, womit ähnliche Gehalte dieses Nährstoffes wie bei Rinderfrischmist erreicht werden (BEER et al. 1990, AIRAKSINEN et al. 2001). Somit kann frischer Pferdemist zum einen wegen der vergleichsweise hohen Gehalte an Kalium als günstig für die kurzfristige Verfügbarkeit dieses Nährstoffes angesehen werden. Darüber hinaus konnte in Saatplatterbse und Ackerbohne eine teils signifikant höhere CO₂-Entbindung aus dem Boden nach der Düngung von Pferdemist - insbesondere zu den ersten Messterminen - gegenüber den anderen Prüfgliedern und der Kontrolle festgestellt werden (siehe auch Tab. 11, Tab. 19 und Tab. A 8 bis Tab. A 10). Das lässt darauf schließen, dass das frische organische Material im Boden sehr schnell biologischen Abbauprozessen unterlag und zu einer raschen Freisetzung des im Pferdemist enthaltenen Kaliums führte.

Die ausgebrachten Mengen an Kalium mit Stroh (54 und 82 kg ha⁻¹ K) und Gehölzhäcksel (137 und 103 kg ha⁻¹ K) waren deutlich geringer im Vergleich zu den Varianten mit Düngung von Grüngutkompost, Pferdemist und Kaliumsulfat / Rohphosphat. Dennoch konnten nach der Düngung von Gehölzhäcksel in den Jahren 2009 und 2010 tendenziell erhöhte K-Gehalte im Spross des Rotklee und im Jahr 2009 um bis zu 50 kg ha⁻¹ höhere Entzüge an Kalium in dieser Variante gegenüber der Kontrolle festgestellt werden. Aufgrund der genannten Eigenschaften des Kaliums in der Pflanze und des weiten C/N-Verhältnis im Häckselgut, verbunden mit einer sehr langsamen Freisetzung von zumeist organisch gebundenen Nährstoffen, ist ausschließlich bei Kalium von einer erkennbaren kurzfristigen Nährstoffwirkung auszugehen. Dies zeigen auch TIAN et al. (1992) in Untersuchungen mit Gehölzhäcksel, Maisstroh und Reisstroh im Freiland. Festgestellt wurde hier eine Freisetzung des in den gedüngten organischen Materialien enthaltenen Stickstoffs und Phosphors von weniger als 10 % gegenüber dem enthaltenen Kalium in Höhe von 80 % der gedüngten Nährstoffmenge nach einem Zeitraum von 100 Tagen in Abhängigkeit vom Anteil an Lignin im Kohlenstoff des Düngemittels. PAYAN-ZELAYA

et al. (2013) ermittelten in ihren Untersuchungen (Gefäß und Freiland) eine steigende Verfügbarkeit an Kalium im Boden 30 Tage nach der Düngung von Gehölzhäcksel. Durch eine Inokulation des Gehölzhäcksel mit Mikroorganismen konnte die Höhe der Kalium-Freisetzung nochmals gesteigert werden, was darauf hinweist, dass auch die Höhe und die Geschwindigkeit der Kaliumverfügbarkeit aus organischem Material im Boden zu einem Teil von der biologischen Umsetzung bzw. Mineralisierung abhängig ist. TIMMERMAN & KLUGE (1996) gehen von einem rasch pflanzenverfügbaren Anteil des enthaltenen Kaliums in Gehölzhäckseln nach der Applikation von mindestens 50 % aus.

Insgesamt betrachtet, wurde das mit den organischen Düngemitteln ausgebrachte Kalium aufgrund der kürzeren Vegetationszeit der Saatplatterbse von 96 bzw. 98 Tagen nur zu 3,5 bis 9,1 %, hingegen durch den Rotklee mit einer Vegetationszeit von 196 bzw. 200 Tagen zu 14 bis 28 % und damit in einem deutlich höheren Maß ausgenutzt. Erkennbar werden anhand der scheinbaren Nährstoffausnutzung die Verfügbarkeit des Einzelnährstoffes aus dem Düngemittel und das Maß der Nährstoffverfügbarkeit im Boden ohne Düngung. Darüber hinaus lassen sich Aussagen zur Düngewirkung der eingesetzten Düngemittel ableiten. So kann z. B. bei Rotklee mit hohen K-Gehalten ohne Düngung und mit einer scheinbaren Nährstoffausnutzung zwischen 14 und 28 % von einer Nährstoffwirkung ausgegangen werden.

Phosphor

Die P-Gehalte in den verwendeten Partien der organischen Düngemittel lagen mit 0,17 bis 0,25 % in der TM des Grüngutkompostes bzw. mit 0,17 bis 0,35 % in der TM des Pferdemistes auf einem ähnlich hohen Niveau und werden von Angaben aus anderen Quellen bestätigt: Pferdemist 0,47 % (DÖHLER 2005) und Grüngutkompost 0,5 bis 0,8 % (SAGER 2007). Hauptsächlich wird Phosphor von Pflanzen in Form von Orthophosphat (H_2PO_4^- und HPO_4^{2-}) aufgenommen, zumeist rasch metabolisiert und in organisches Phosphat überführt (MENGEL 1991, HE et al. 2001, CAMPBELL & REECE 2003, BARKER 2007). Nur zum geringen Teil liegt Phosphor im Cytoplasma in anorganischer Form vor (BIELESKI & FERGUSON 1983). Daher ist die Freisetzung von Phosphor aus organischen Düngemitteln eng mit dem biologischen Aufschluss der enthaltenen Phosphorverbindungen - analog zur Mineralisierung des enthaltenen Stickstoffs - verbunden. JACOBSEN (1995) schätzt bei Grüngutkomposten den sofort

pflanzenverfügbaren P-Anteil in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial auf etwa 16 % des Gesamt-P. Eine Abhängigkeit der P-Verfügbarkeit von der Mineralisierung des organischen Düngemittels zeigen u. a. Untersuchungen von COURTNEY & MULLEN (2008) mit verschiedenen Komposten. Demnach wurde bei der Applikation von Kompost mit einem C/N-Verhältnis von 17 der CAL-extrahierbare Phosphor im Boden gegenüber der Kontrolle in Abhängigkeit von der gedüngten Menge an Phosphor (60, 120 und 240 kg ha⁻¹) um den Faktor 2, 4,7 und 7,5 angehoben. Bei einem C/N-Verhältnis von 29 im applizierten Kompost lag die Erhöhung des CAL-extrahierbaren P nur beim Faktor 1,4 bzw. 2 und 2,4.

In den eigenen Untersuchungen lagen die mit Grüngutkompost ausgebrachten Mengen an Phosphor zwischen 83 und 110 kg ha⁻¹. Mit dem Pferdemist wurden zwischen 40 und 70 kg ha⁻¹ P ausgebracht. Trotz der vergleichsweise hohen Mengen an ausgebrachtem Phosphor konnte nur in der Schnittgut-TM des Rotklees (erster Schnitt im Jahr 2010) nach der Düngung von Grüngutkompost ein signifikant erhöhter P-Gehalt gegenüber der Kontrolle festgestellt werden. Sowohl bei der Saatplatterbse als auch bei der Ackerbohne und in der Spross-TM des Rotklees (Mischprobe aus 3 Schnitten + Stoppel) wurden keine erhöhten P-Gehalte und P-Entzüge nach der Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist ermittelt. Als Ursache dafür könnte zum einen die oben genannte geringe Verfügbarkeit aus den Düngemitteln zu sehen sein. Darüber hinaus stand dem geringen Bedarf an Phosphor etwa im Vergleich zum Kalium eine gute P-Verfügbarkeit im Boden am Versuchsstandort gegenüber. Im zweijährigen Mittel der Kontrolle wurden durch die Saatplatterbse lediglich 14 kg ha⁻¹ P und mit dem Gesamtsprossertrag des Rotklees 27 kg ha⁻¹ P entzogen. Die P-Gehalte des Bodens lagen nach der Bodenanalyse jeweils zu Versuchsbeginn zwischen 5,8 und 6,8 mg je 100 g Boden, was als eine ausreichend hohe Menge für eine gute P-Verfügbarkeit im Boden angesehen werden kann (LFL 2008). Auch die P-Gehalte in der Trockenmasse der untersuchten Leguminosen in der Kontrolle ohne Düngung deuten auf eine ausreichend hohe P-Verfügbarkeit hin. Hier lagen die P-Gehalte in der Spross-TM der Saatplatterbse zwischen 2,6 und 2,9 g kg⁻¹, im Blatt der Ackerbohne zwischen 2,4 und 3,8 g kg⁻¹ und in der Spross-TM des Rotklees bei 2,6 g kg⁻¹. BISHOP et al. (1976) ermittelten P-Gehalte in der Blatt-TM von Ackerbohne zum Zeitpunkt der Blüte zwischen 3,2 und 4,1 g kg⁻¹ und stuften diese als Anhaltspunkt einer ausreichenden P-Verfügbarkeit für die Pflanzen ein. WAHID & MEHANA (2000) stellten nach der Düngung von Roh- und

Superphosphat im Rahmen von Gefäßversuchen P-Gehalte in der Stroh-TM von Ackerbohne in Höhe von 3,2 bis 3,6 g kg⁻¹ fest. KELLING et al. (1990) geben für Rotklee einen P-Gehalt für eine ausreichende Verfügbarkeit von 2,0 und 4,0 g kg⁻¹ TM an. Von einer erhöhten P-Aufnahme nach der Düngung von Komposten bei unterschiedlichen Kulturen wird dennoch in anderen Arbeiten berichtet. Vor allem in Gefäßversuchen unter kontrollierten Bedingungen wurden zumeist signifikante Unterschiede der P-Aufnahme beschrieben, während bei Untersuchungen im Feld offenbar der Jahreseinfluss (Witterungsverlauf) einen größeren Einfluss auf die P-Verfügbarkeit im Boden hat. So ermittelten z.B. SOUMARE (2003) in Gefäßversuchen nach der Düngung von Bioabfallkompost (Äquivalent von 32 kg ha⁻¹ verfügbares P, C/N-Verhältnis 16,2) signifikant höhere P-Gehalte im Spross von Deutschem Weidelgras gegenüber der Kontrolle nach 58 Tagen Vegetationszeit. NISHANTH & BISWAS (2008) wiesen in Inkubationsversuchen eine langsame Freisetzung des organisch gebundenen Phosphors in Kompost innerhalb von 14 Tagen nach der Applikation nach, während das enthaltene Kalium im Kompost zum Großteil sofort pflanzenverfügbar war. MKHABELA & WARMAN (2005) konnten nach der Düngung von Bioabfallkompost in Feldversuchen (C/N-Verhältnis im Kompost: 23, gedüngte Mengen an P: 64, 125 und 189 kg ha⁻¹) zu Kartoffeln keine Unterschiede hinsichtlich der P-Aufnahme der Kartoffel zum Zeitpunkt der Blüte feststellen. Die Höhe der P-Entzüge zeigte allerdings in diesen Untersuchungen einen signifikanten Jahreseffekt. Auch die scheinbare Ausnutzung zwischen 0,7 und 3,1 % der mit den organischen Düngemitteln gedüngten Menge an Phosphor durch die Saatplatterbse bzw. zwischen 0,8 und 7,8 % durch den Rotklee in den eigenen Untersuchungen deutet darauf hin, dass hinsichtlich der P-Aufnahme kurzfristig nur ein geringer Effekt infolge der Düngung mit den eingesetzten Düngemitteln zu erwarten war.

Mit dem verwendeten weicherartigen Rohphosphat in der Variante „Mineral“ wurden mit einer Menge von 102 kg ha⁻¹ P zu Ackerbohne und Rotklee etwa gleich hohe Mengen an Phosphor ausgebracht wie in der Variante mit Düngung von Grüngutkompost mit welcher 83 kg ha⁻¹ P im Jahr 2009 bzw. 110 kg ha⁻¹ P im Jahr 2010 gedüngt wurden. Sowohl der P-Gehalt im Blatt der Ackerbohne im Jahr 2009 als auch der P-Entzug mit dem ersten Schnitt des Rotklees im Jahr 2010 war nach der Düngung von Grüngutkompost gegenüber der mineralischen Düngung signifikant erhöht. Die ermittelten P-Gehalte im Blatt der Ackerbohne lagen in beiden Versuchsjahren (2009 und 2010) nach der Düngung von Rohphosphat jeweils unter

den Werten der Vergleichsvarianten. Zudem konnte der gedüngte Phosphor nach der Applikation von Grüngutkompost durch die Saatplatterbse und den Rotklee jeweils besser ausgenutzt werden als nach der Düngung von Rohphosphat. Die Ergebnisse lassen einerseits eine sehr geringe P-Verfügbarkeit aus dem verwendeten Rohphosphat erkennen und weisen diesbezüglich auf eine deutlich bessere kurzfristige P-Nährstoffwirkung von Grüngutkompost hin. Da der Phosphor in Rohphosphaten hauptsächlich in Form von Ca-Phosphaten (Hydroxyl-, Flour- und Carbonatapatit) vorliegt, ist eine rasche Verfügbarkeit für Pflanzen in dieser Form nicht gegeben und wesentlich beeinflusst vom pH-Wert des Bodens, dem Gehalt an austauschbarem Kalzium im Boden und der P-Sorptionskapazität des Bodens (MENGEL 1986, CHIEN & MENON 1995, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010). BROWN & GWINN versuchten bereits 1917, den löslichen Anteil im Rohphosphat mit einer kombinierten Düngung von mineralischen und organischen Düngemitteln zu erhöhen. Sie konnten jedoch in ihren Untersuchungen keine Wirkung der eingesetzten Düngemittel hinsichtlich einer besseren Verfügbarkeit von P aus Rohphosphat im Boden nachweisen. Neben den oben genannten bodenbürtigen Faktoren nehmen auch die Pflanzen selbst Einfluss auf die Verfügbarkeit des vorhandenen Phosphors im Boden und im Rohphosphat. So kann etwa die Wurzelexsudation organischer Säuren (Zitronensäure und Carbonsäure) oder die verstärkte Aufnahme von Ca-Ionen eine Absenkung des pH-Wertes ($< 5,5$) in der wurzelnahen Rhizosphäre bewirken und die P-Verfügbarkeit aus Rohphosphaten signifikant erhöhen (BEKELE et al. 1983, HOFFLAND et al. 1989, HOFFLAND 1992, HINSINGER & GILKES 1997, NEUMANN & RÖMHELD 1999). Besonders Leguminosen tragen mit der verstärkten Aufnahme basisch wirkender Kationen und der Abgabe von H^+ -Ionen im Rahmen der symbiotischen Fixierung von Luftstickstoff zu einer Absenkung des pH-Wertes im Wurzelbereich und damit zu einer steigenden P-Verfügbarkeit aus Rohphosphaten bei (AGUILAR & VAN DIEST 1981, ISRAEL & JACKSON 1982). Demgegenüber zeigen Untersuchungen mit Sojabohne und Luzerne bei einer verstärkten Nitrat-Aufnahme der Pflanzen eine Anreicherung von basisch wirkenden Kationen in der Bodenlösung (RILEY & BARBER 1969, SCHUBERT & YAN 1997, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010) und eine signifikante Verringerung der P-Verfügbarkeit aus Rohphosphat (AGUILAR & VAN DIEST 1981). Da einerseits auf ökologisch bewirtschafteten Flächen die P-Verfügbarkeit aufgrund geringer Zufuhren häufig sehr gering ist (SCHMIDTKE et al. 2015) und andererseits die Düngung von

Rohphosphat derzeit die einzige Möglichkeit einer mineralischen P-Düngung im ökologischen Landbau darstellt, unterstreichen die hier ermittelten Ergebnisse den Bedarf alternativer P-Dünger vor allem mit kurzfristiger Wirkung deutlich.

Mit der Düngung von Stroh und Gehölzhäcksel wurden aufgrund der vergleichsweise niedrigen P-Gehalte in den Düngemitteln gegenüber den anderen Düngevarianten mit $14 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ bzw. $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ jeweils die geringsten Mengen an Phosphor ausgebracht. Die P-Gehalte im verwendeten Gehölzhäcksel lagen im Bereich zwischen 0,09 und 0,12 % in der TM. Dementsprechend wurde anhand der untersuchten Leguminosen keine verbesserte P-Verfügbarkeit nach der Düngung von Gehölzhäcksel festgestellt. Einen vergleichsweise geringen P-Gehalt zwischen 0,06 und 0,19 % der TM im Häckselgut bestätigen auch eigene Untersuchungen von acht unterschiedlichen Gehölzarten (LUX & SCHMIDTKE 2013). Die oben genannte Kopplung der P-Freisetzung an eine Mineralisierung der organischen P-Verbindungen hat aufgrund der weiten C/N-, und C/P-Verhältnisse, vor allem bei der Verwendung von Stroh und verholztem bzw. lignifiziertem Material eine größere Bedeutung (PALM & SANCHEZ 1991). Eine Abhängigkeit der Freisetzung enthaltener Nährstoffe von der Art der Bindung im Ausgangsmaterial bestätigen auch SZOTT et al. (1991) nach Untersuchungen von Häckselgut verschiedener Gehölzarten. Demnach wurden im Mittel der untersuchten Gehölze in einem Zeitraum von 4 Wochen etwa 75 % des enthaltenen Kaliums aus dem Häckselgut freigesetzt und in einem Zeitraum von 32 Wochen etwa 40 % des enthaltenen Phosphors. TIAN et al. (1992) schließen nach Untersuchungen von Gehölzhäcksel, Maisstroh und Reisstroh auf eine Abhängigkeit der P-Freisetzung im Boden nach der Ausbringung vom Anteil an Lignin am Gehölz-C. Ermittelt wurde im Mittel eine Freisetzung von 80 % des enthaltenen Kaliums aber nur 10 % des enthaltenen Phosphors in einem Zeitraum von 100 Tagen. TIMMERMANN & KLUGE (1996) schätzen den Anteil an löslichem und damit pflanzenverfügbarem Phosphor in Gehölzhäckseln als sehr gering und damit kurzfristig nicht düngungsrelevant ein.

Schwefel

Von den untersuchten Leguminosen wurden vor allem im Blatt der Ackerbohne signifikant erhöhte S-Gehalte (Bereich: 2 bis $4,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) nach der Düngung von Pferdemit und Grüngutkompost gegenüber der Kontrolle festgestellt. Bei Saatplatterbse ($1,8$ bis $2,8 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) und Rotklee (2 bis $4,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$) konnten

hingegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Prüfgliedern im S-Gehalt im Spross ermittelt werden. MC NAUGHT et al. (1961), SPENCER et al. (1977), INGESTAD (1982), SCAIFE & BURNS (1985) und HANEKLAUS et al. (2007) verweisen darauf, dass prinzipiell bei hohen Gesamt-S-Gehalten in der pflanzlichen Biomasse - alternativ zum $\text{SO}_4\text{-S}$, zum $\text{SO}_4\text{-S/Gesamt-S}$ Index oder dem N/S Index - von einer ausreichend hohen S-Verfügbarkeit im Boden ausgegangen werden kann. Die Gesamt-S-Gehalte in der pflanzlichen Biomasse variieren jedoch stark in Abhängigkeit vom untersuchten Pflanzenteil und vom Alter der gedüngten Pflanzen. ZHAO et al. 1999 wiesen in Untersuchungen mit Erbse (*Pisum sativum* L.) deutliche Unterschiede der S-Gehalte einzelner Pflanzenteile nach. Nach mineralischer S-Düngung lag der S-Gehalt zwischen 2,3 und 2,8 g kg⁻¹ TM im Spross der Erbse und zwischen 7,4 und 10,8 g kg⁻¹ TM in der Wurzel. Gegenüber der Kontrolle wurde somit in dieser Untersuchung im Spross ein 2 bis 3-fach höherer und in der Wurzel ein 6 bis 9-fach höherer S-Gehalt ermittelt. Auch SCHERER et al. (2008) ermittelten in Untersuchungen an Erbse und Luzerne deutlich höhere S-Gehalte in den Wurzeln der Pflanzen gegenüber den Gehalten im Spross und führen das auf die als S-Senke charakterisierten Knöllchen zurück, welche den Wurzeln zugerechnet werden. VARIN et al. (2010) fanden in ihren Untersuchungen mit Weißklee in der Reihenfolge Knöllchen > Blatt > Wurzel > Stängel/Stolon abnehmende S-Gehalte in der Biomasse und wiesen eine geringe Erhöhung der S-Düngermenge ausschließlich in den Knöllchen nach. Demnach lassen sich mit der Untersuchung der Knöllchen von Leguminosen auftretende Verdünnungseffekte (höhere TM-Bildung bedingt geringeren S-Gehalt) in den Pflanzen aufgrund einer gesteigerten S-Düngung methodisch umgehen und auch geringe Änderungen der S-Verfügbarkeit über die Untersuchung der S-Gehalte in den Knöllchen der Leguminosen nachweisen. Auch in den eigenen Untersuchungen hätte die Analyse der Wurzeln bzw. der Knöllchen anstelle des Sprosses der Saatplatterbse und des Rotkleees möglicherweise besser zu differenzierende Ergebnisse erbracht.

Bei den Entzügen an Schwefel zeigten sich jedoch auch bei Saatplatterbse nach der Düngung von Pferdemist und bei Rotklee nach der Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist signifikant höhere Werte gegenüber der Kontrolle. Dies deutet auf eine erhöhte S-Verfügbarkeit vor allem mit Blick auf die überwiegend organisch gebundene Form des Schwefels in den organischen Düngemitteln (gedüngte Menge an Schwefel zwischen 45 und 86 kg ha⁻¹) auch vor dem Hintergrund einer sehr

hohen Versorgung mit leicht löslichem Schwefel mit der Düngung von Kaliumsulfat ($173 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$) hin. Das entspricht den Ergebnissen anderer Versuchsansteller, wonach insbesondere durch die Düngung von Grüngutkompost ($42 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$, LUNDEGARDH et al. 2008), aber auch von Mist (Gemisch aus Mist von Rind, Schaf, Huhn) und von Bioabfallkompost (44 bzw. $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$, ZHELJAZKOV et al. 2006) eine gesteigerte S-Verfügbarkeit für Leguminosen hervorgerufen wird. ELSHEIK & ELZIDANY (1997) ermittelten nach einer Düngung von 9 t ha^{-1} Hühnermist einen nur leicht erhöhten S-Gehalt im Korn der Ackerbohne gegenüber der Kontrolle ohne Düngung. Nach Düngung von 80 kg ha^{-1} mineralischem N wurde ein gleich hoher S-Gehalt im Korn erzielt, was auf eine eher indirekte Düngewirkung des Mistes (S-Mineralisierung im Boden durch Düngung) hindeutet. In diesem Versuch konnte auch eine Erhöhung der Gabe an Hühnermist auf 15 t ha^{-1} nicht den erzielten S-Gehalt in der Ackerbohne, welche mit 25 kg ha^{-1} elementarem Schwefel gedüngt wurde, erreichen. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen lagen die absoluten Entzüge an Schwefel mit Werten zwischen 11 bis 16 kg ha^{-1} beim Rotklee (Mischprobe aus 3 Schnitten) und 11 bis 14 kg ha^{-1} bei der Saatplatterbse auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Damit ordnen sich Leguminosen zwischen Kulturen mit einem sehr hohen S-Bedarf wie Raps mit einem Entzug im Bereich von 26 bis $51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ und Getreide mit einem Entzug zwischen 10 und 15 kg ha^{-1} sein (MC GRATH & ZHAO 1996, SCHERER 2001, ZHELJAZKOV et al. 2006). Einen S-Entzug von 9 kg ha^{-1} (68 dt Spross-TM) ermittelte BÖHM (2013) bei Rotklee gras ohne S-Düngung gegenüber der mit $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ gedüngten Variante, welche einen Entzug von $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ (80 dt Spross-TM ha^{-1}) aufwies. Dem entsprechen nach HANEKLAUS et al. (2007) die S-Gehalte in der TM von Ölsaaten (*Brassica ssp.*) mit $4,8 \text{ g kg}^{-1}$, Körnerleguminosen mit $2,7 \text{ g kg}^{-1}$ und Futterpflanzen (Leguminosen und Gräser) mit $2,1 \text{ g kg}^{-1}$ (Median der optimalen Versorgungsstufe).

Schwefel-Mangel führt bei Leguminosen zu einer verminderten Bildung von Speicherproteinen mit einem hohen Anteil schwefelhaltiger Aminosäuren wie z.B. Methionin und Cystein (DE BOER & DUKE 1982, GAYLOR & SYKES 1985). Eine erhöhte Verfügbarkeit an Schwefel kann hingegen - insbesondere auf S-limitierten Standorten (S_{\min} im Frühjahr $< 10 \text{ kg ha}^{-1}$) - sowohl bei Körnerleguminosen (HABTEGEBRIAL et al. 2007, HUSSAIN et al. 2011) als auch bei Futterleguminosen (FISCHINGER et al. 2011, BECKER et al. 2013, FISCHINGER et al. 2013) zu einer gesteigerten TM-Bildung führen und den Anteil an symbiotisch fixiertem Stickstoff am Spross-N

erhöhen. SCHERER & LANGE (1996) ermittelten mit einer mittleren und hohen Schwefel-Düngemenge bei Luzerne und Rotklee, sowie bei Ackerbohne und Erbse eine signifikant erhöhte Spross-TM. Kombiniert mit einer N-Düngung auf niedrigem Niveau konnte der Anteil an symbiotisch fixiertem Luftstickstoff (N_{dfa}) vor allem bei den Körnerleguminosen bis auf 93 % (Futterleguminosen max. 88 % N_{dfa}) gesteigert werden. Auch in den eigenen Untersuchungen wurde bei der Ackerbohne der symbiotisch fixierte Anteil am Spross-N mit einem Wert von 80 % (im Mittel von 2 Jahren) nach mineralischer Düngung festgestellt (Tab. 17). Bei Rotklee konnte nach mineralischer Düngung eine signifikant höhere N-Aufnahme ($N_{fixiert} + N_{Boden}$) gegenüber der Kontrolle um 18 % im Jahr 2009 und um 12 % im Jahr 2010 ermittelt werden (siehe auch Tab. A 40). Der N-Entzug der Referenzkultur Welsches Weidelgras lag hingegen in derselben Variante in beiden Jahren unter dem Wert der Kontrolle. Das lässt darauf schließen, dass die beschriebenen Unterschiede bei Ackerbohne und Rotklee auch auf die erhöhte S-Verfügbarkeit nach mineralischer Düngung zurückzuführen ist. Da die absolut fixierten N-Mengen des Rotklees nach der Düngung von Pferdemist (2009) und Grüngutkompost (2010) jeweils auf demselben Niveau der mineralisch gedüngten Variante lagen, lässt die Schlussfolgerung zu, dass in den genannten organischen Düngevarianten auch eine Schwefelwirkung vorlag (siehe auch Tab. A 40 und Abb. 26).

RIFFEL et al. (2013) stellten in ihren Untersuchungen nach mineralischer S-Düngung ($80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ CaSO}_4$) von Luzerne-Kleegrass einen um 50 % höheren Kornertrag eines nachfolgenden Weizens fest. Sie führten diesen Effekt auf eine erhöhte N-Mineralisierung im Boden durch erhöhte S_{min} -Gehalte im Folgejahr und auf den erhöhten N-Ertrag des Weißklees gegenüber der Kontrolle mit einem entsprechend hohen Angebot an N_{min} in der Vegetationsperiode des Weizens zurück. Die in den eigenen Untersuchungen ermittelten positiven Vorfruchteffekte der Ackerbohne im Jahr 2010 hinsichtlich des Kornertrages und des N-Entzuges des folgenden Weizens, waren vor allem nach der Düngung von Grüngutkompost zu beobachten (Tab. A 41 und Tab. A 43). Nach mineralischer Düngung mit hohen ausgebrachten S-Mengen konnte hingegen kein signifikanter Effekt auf den nachfolgenden Weizen festgestellt werden. So kann auch in der Variante mit Düngung von Grüngutkompost eher von einer N-Mineralisierung im Folgejahr aus dem Kompost selbst und der verbliebenen N-Mengen der Vorfrucht ausgegangen werden.

Molybdän

Nach Düngung von Kaliumsulfat und Rohphosphat wurden signifikant geringere Mo-Gehalte in der Spross-TM des Rotklee und im Blatt der Ackerbohne gegenüber den Vergleichsvarianten festgestellt. Im Mittel der Jahre 2009 und 2010 lagen die Mo-Gehalte zum ersten Schnitt des Rotklee mit $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ TM nach Düngung von Kaliumsulfat und Rohphosphat ca. 80 % unter dem Wert der Kontrolle (vergl. auch Abb. 24 und Tab. A 28). Auch in der Mischprobe aus drei Schnitten war der Mo-Gehalt mit $1,7 \text{ mg kg}^{-1}$ TM im Spross des Rotklee nach Düngung von Kaliumsulfat und Rohphosphat gegenüber der Kontrolle noch um 40 % reduziert (Tab. A 32).

Aufgrund der hohen Menge an Schwefel in Höhe von 173 kg ha^{-1} , welche mit dem Kaliumsulfat in leicht löslicher Form ausgebracht wurde, kann von einem Ionenantagonismus des Schwefels gegenüber dem Molybdän ausgegangen werden. HAMLIN (2007) gibt dafür die identische Ladungsrichtung- und -stärke der von den Pflanzen aufgenommenen Ionen des Schwefels in Form von SO_4^{2-} und des Molybdän in Form von MoO_4^{2-} an. Ähnliche Werte wie in den eigenen Untersuchungen festgestellt, ermittelte auch HEMINGWAY (1962) in Untersuchungen mit Klee gras. Nach einer Düngung von Ammoniumsulfat lag der Mo-Gehalt in der Spross-TM des Weißklee zwischen $0,5$ und $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ TM und damit etwa 60 % unter dem Wert der Kontrolle. STOUT et al. (1951) ermittelten nach der Düngung von Schwefel in Höhe von 50 kg ha^{-1} in Form von CaSO_4 einen Rückgang des Molybdängehaltes im Spross von Körnererbse um 38 % und bei einer gedüngten Menge an Schwefel von 200 kg ha^{-1} um 56 %. GUPTA & MEHLA (1980) berichten von einem Rückgang des Mo-Gehaltes im Spross von Alexandrinerklee mit steigender S-Düngemenge, insbesondere zum ersten Schnitt des Klee. Beim zweiten und dritten Schnitt war der Einfluss des Schwefels noch erkennbar, jedoch in deutlich abgeschwächter Form. In den eigenen Untersuchungen wurde mit dem Grüngutkompost im zweijährigen Mittel ca. 82 kg ha^{-1} S zu den Leguminosen ausgebracht. Da bei allen untersuchten Leguminosen nach der Düngung von Grüngutkompost jeweils die höchsten Mo-Gehalte festgestellt wurden und gleichzeitig die S-Gehalte nicht unter den Werten der Vergleichsvarianten lagen, kann auf ein günstiges Verhältnis der aus dem Grüngutkompost freigesetzten Nährstoffe geschlossen werden. BARTL et al. (2002) stellten nach fünfjähriger Düngung mit Bioabfallkompost (jährlich gedüngte Menge $\sim 320 \text{ dt ha}^{-1}$ FM) keinen Unterschied der Mo-Gehalte in der Korn-TM von Hafer und Dinkel im Vergleich zur

Kontrolle fest. Im Korn von Hafer und Dinkel wurden jedoch signifikant verminderte Mo-Gehalte nach NPK-Düngung ermittelt. Da die Untersuchung des Bodens im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle und zur Kompostvariante deutlich erhöhte Gehalte an S_{\min} ergaben, gehen die Autoren von einer verstärkten S-Mineralisierung und einem damit verbundenen Aufnahmeantagonismus zum Molybdän in diesem Versuch aus.

MUNSON (1998) gibt als Orientierungswert (verschiedene Pflanzenarten) für eine unzureichende Mo-Verfügbarkeit einen mittleren Mo-Gehalt im Blatt von $< 0,15 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$ an. Auch GUPTA (1997) bestätigt diesen Wert und gibt speziell für Rotklee einen Mo-Gehalt zwischen 0,3 und 1,6 $\text{mg kg}^{-1} \text{ TM}$ als Indikator für eine ausreichend hohe Mo-Verfügbarkeit an, so dass in den eigenen Untersuchungen nicht von einem Mo-Mangel in der Variante Mineral im eigentlichen Sinn ausgegangen werden kann, sondern nur von einer eingeschränkten Verfügbarkeit. LUNDEGÄRDH (1960) weist im Zusammenhang mit Ionenantagonismus darauf hin, dass sich die Aufnahme eines der kompetitiven Ionen lediglich zeitlich verzögert, nicht jedoch völlig zum Erliegen kommt. Das würde erklären, warum die Unterschiede der Mo-Gehalte zwischen den Prüfgliedern vor allem beim ersten Schnitt des Rotklee besonders deutlich zu erkennen waren, sich in der Mischprobe aus allen Schnitten dagegen in der Höhe der Werte deutlich geringere Unterschiede im Mo-Gehalt zeigten. Zu berücksichtigen sind bei der Einschätzung der Mo-Versorgung - ähnlich wie bei Schwefel - unterschiedlich hohe Mo-Gehalte in einzelnen Pflanzenteilen. BECKING (1961) zufolge differiert der Mo-Gehalt bei der N_2 -fixierenden Baumart Erle (*Alnus* spp.) erheblich zwischen Wurzel ($0,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$), Knöllchen ($1,7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$) und Samen ($2,1 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$). MULDER (1948) ermittelte in Erbsenpflanzen noch deutlich höhere Unterschiede der Mo-Gehalte zwischen Blatt ($0,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$), Wurzel ($2,0 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TM}$) und Knöllchen (4 bis 8 $\text{mg kg}^{-1} \text{ TM}$), was sicher als Hinweis auf die hauptsächliche Funktion des Molybdäns zu sehen ist.

BORTELS (1930) wies bereits 1930 anhand von Untersuchungen mit *Acetobacter* (ssp.) die Bedeutung des Molybdäns für die biologische Stickstofffixierung nach. Er zeigte, dass das Wachstum der N_2 -fixierenden Bakterien ohne die Anwesenheit von Molybdän auf einem N-freien Nährmedium sehr eingeschränkt ausfiel und leitete daraus die Funktion des Molybdäns als „Katalysator der biologischen N_2 -Bindung“ ab. In Düngeversuchen mit verschiedenen Kulturen im Feld wies BORTELS (1937) ertragssteigernde Effekte einer Molybdän-Düngung ausschließlich bei Leguminosen

(Rotklee, Erbse, Soja) nach, während eine Mo-Düngung zu Senf keine Wirkung zeigte. In Untersuchungen von HASHIMOTO & YAMASAKI (1976) reagierten nur nodulierte Sojabohnen mit einem signifikant höheren Kornertrag auf eine Mo-Düngung. Eine nicht nodulierte Sorte der Sojabohne reagierte demgegenüber nicht auf die Düngung mit Molybdän. ERFKAMP & MÜLLER (1990), SCHNEIDER et al. (1991), MYLONA et al. (1995) und WELCH (1995) sowie SCHNEIDER & MÜLLER (1999) bestätigen die Bedeutung des Molybdäns vor allem für das Mo-abhängige Enzymsystem Nitrogenase in den Knöllchen der Leguminosen. Demnach bleiben alternative bzw. Mo-unabhängige Nitrogenasen (V-Nitrogenase, Fe-Nitrogenase) auf wenige Organismen beschränkt und haben hinsichtlich der Größenordnung der fixierten Menge an Luftstickstoff nur eine untergeordnete Bedeutung. In den eigenen Untersuchungen konnte im zweijährigen Mittel kein geringerer Anteil an fixiertem Luftstickstoff (N_{dfa}) und keine geringere Menge Spross-N bei Rotklee in der Variante Mineral festgestellt werden (Tab. 18, Abb. 26). Bei der Ackerbohne wurde im Mittel in der Variante Mineral sogar der höchste Anteil an fixiertem Luftstickstoff ermittelt (Tab. 17). Das bestätigt die oben genannte Schlussfolgerung der lediglich eingeschränkten Verfügbarkeit des gedüngten und des im Boden vorhandenen Molybdäns aufgrund des erkennbaren Aufnahmeantagonismus zum Schwefel.

Die Verfügbarkeit von Molybdän im Boden hängt im Wesentlichen von der Adsorption des Molybdäns an Al- und Fe-Oxide, Tonminerale und Huminsäuren ab, wobei u. a. CRUYWAGEN & DE WET (1988) sowie BIBAK & BORGGGAARD (1994) in ihren Untersuchungen eine abnehmende Adsorption mit steigendem pH-Wert (stark abnehmende Adsorption ab pH-Wert > 5) ermittelten. Auch Gupta et al. (1978), HOCHMUTH et al. (2002) und FERNÁNDEZ & HOEFT (2009) weisen auf eine signifikante Erhöhung der Mo-Verfügbarkeit bei zunehmendem pH-Wert im Boden hin. GUPTA (1997) ermittelte bei einem steigenden pH-Wert im Boden eine Erhöhung des Mo-Gehaltes im Spross von Luzerne, wobei ab einem pH-Wert von 6,5 kein Anstieg des Mo-Gehaltes mehr zu verzeichnen war. ROY et al. (1986) zeigten darüber hinaus, dass die Stärke bzw. der Umfang der Adsorption von der Anwesenheit kompetitiver Ionen gleicher Ladungsstärke und -richtung (z.B. MO_4^{2-} und HPO_4^{2-}) in der Bodenlösung abhängig ist. Das würde bedeuten, dass bei einem hohen Gehalt an Phosphor in mineralischer Form im Boden, Molybdän verstärkt pflanzenverfügbar wäre. Eine Förderung der Mo-Aufnahme der Pflanzen durch die Anwesenheit von Phosphor in Form von PO_4^{3-} im Boden führt BARSHAD (1951) auf die Bildung von

Phosphomolybdat zurück. Den Effekt einer abnehmenden Adsorption an Tonminerale im Boden mit steigender Mo-Ionenkonzentration in der Bodenlösung beschreiben neben CRUYWAGEN & DE WET (1988) und BIBAK & BORGGAARD (1994) auch GOLDBERG & FORSTER (1998). DAVIES (1956) verweist in diesem Zusammenhang auf die Mo-fixierenden Eigenschaften verschiedener Tonminerale. Nach der Untersuchung von 105 Böden in Mitteldeutschland kommen auch MICHAEL & TROBISCH (1961) zu dem Schluss, dass neben dem pH-Wert, vor allem die geologische Herkunft des Bodens und damit die Art der vorliegenden Tonminerale einen entscheidenden Einfluss auf die Verfügbarkeit von Molybdän hat. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurde der Mo-Gehalt im Boden am Versuchsstandort nicht ermittelt. Aufgrund der Mo-Gehalte in der Trockenmasse der geprüften Leguminosen ohne Düngung (Saatplatterbse 1,0 und 2,7 mg kg⁻¹ TM, Ackerbohne Blatt 3,1 und 2,7 mg kg⁻¹ TM, Rotklee 1,7 und 2,3 mg kg⁻¹ TM) kann davon ausgegangen werden, dass die Mo-Verfügbarkeit im Boden im Versuchszeitraum grundsätzlich nicht eingeschränkt war.

Die mit dem Grüngutkompost ausgebrachten Mengen an Molybdän betrugen 102 g ha⁻¹ im Jahr 2009 und 320 g ha⁻¹ im Jahr 2010. BORCHMANN (2002) gibt einen Mo-Entzug im Rahmen einer Fruchtfolge zwischen 4 und 20 g ha⁻¹ an, verweist aber auf einen Düngebedarf von etwa 500 g ha⁻¹ in Form eines Bodendüngemittels und ca. 300 g ha⁻¹ in Form eines Blattdüngemittels. Neben Raps werden vor allem Körnerleguminosen als Kulturen mit einem hohen Mo-Bedarf eingestuft. In einer Übersicht zum Mo-Bedarf verschiedener Ackerkulturen des KTBL (2005) werden vor allem Lupine, Rotklee und Luzerne als Mo-bedürftig eingestuft. HEMINGWAY (1962) ermittelte in seinen Untersuchungen einen jährlichen Mo-Entzug von Klee gras im Bereich von 6,9 und 7,9 g ha⁻¹, wobei vor allem der Weißklee mit einem Mo-Gehalt von 2,6 bis 2,7 mg kg⁻¹ TM gegenüber den Gräsern mit 1,2 bis 2,2 mg kg⁻¹ TM eine größere Bedeutung hinsichtlich des Mo-Entzuges hat. In Tab. 29 sind die ermittelten Mo-Gehalte der eingesetzten Düngemittel in den Jahren 2008 bis 2010 den Angaben anderer Versuchsansteller gegenübergestellt. Ersichtlich ist, dass jegliche Form der organischen Düngung zu einer Zufuhr an Molybdän beiträgt, wobei vor allem Pferdemist und Grüngutkompost aufgrund der vergleichsweise hohen Mo-Gehalte von besonderem Interesse sind. Von der Düngung mit Stroh und Gehölzhäcksel sind nach den eigenen Ergebnissen und aufgrund der niedrigen Gehalte an Mo kurzfristig keine direkten Mo-Nährstoffwirkungen zu erwarten. Auch nach der Düngung von

Pferdemist konnten trotz vergleichsweise hoher Gehalte im Düngemittel bei keiner der untersuchten Leguminosen - mit Ausnahme von Saatplatterbse im Jahr 2009 - erhöhte Mo-Gehalte im Spross bzw. im Blatt festgestellt werden.

Tab. 29: Molybdängehalt der in den eigenen Untersuchungen geprüften Düngemittel im Vergleich zu Angaben anderer Autoren

Düngemittel	Eigene Werte	Literatur	Quelle
mg kg ⁻¹ TM	mg kg ⁻¹ TM		
Stroh	0,22	0,09	YU et al. 2002
		0,1 bis 0,15	GUPTA 1971b
		0,09 bis 0,24	WILLIAMS et al. 1960
Gehölzhäcksel	0,48 bis 0,83	1)	1)
Pferdemist	1,10 bis 2,23	3,1	ATKINSON et al. 1958
		1,46	GUPTA 1971a
		3,50	SAGER 2007
Grüngutkompost	1,81 bis 5,3	0,67 bis 1,09	LISK et al. 1992
		0,1 bis 1,0	GUTSER & EBERTSEDER 2002
		5,7	WILSON et al. 2002
		8,37 ²⁾	MANUNGUFALA et al. 2008

¹⁾ keine Angaben in der Literatur verfügbar, ²⁾ Frischkompost

Das entspricht den Ergebnissen, welche GUPTA (1971a) in einem Bebrütungsversuch nach der Applikation von Rinderfestmist und Mistkompost ermittelte. Demnach konnte nach der Düngung von Mistkompost eine leichte Zunahme der extrahierbaren Mo-Menge im Boden festgestellt werden. Nach der Düngung von Rinderfestmist zeigte sich hingegen ein Rückgang der extrahierbaren Mo-Mengen im Boden. Auch zusätzlich mineralisch gedüngtes Molybdän wurde teilweise durch die Einarbeitung sowohl von Rinderfestmist als auch in geringerem Umfang von Mistkompost im Boden festgelegt und konnte nicht extrahiert werden. ATKINSON et al. (1958) wiesen demgegenüber in ihren Untersuchungen nach der Düngung von Stallmist zu Weißklee an sechs Standorten in zwei Jahren sowohl im Boden, als auch in der Spross-TM des Weißklee deutlich erhöhte Mo-Gehalte (1,35 bis 7,34 mg kg⁻¹ TM) gegenüber der Kontrolle (< 0,05 bis 4,2 mg kg⁻¹ TM) nach. Untersuchungen von BUKOVAC & WITTWER (1957) zeigten, dass die Mobilität von Molybdän in der Pflanze zwischen der von sehr mobilen Stoffen wie Kalium und Schwefel und sehr immobilen Stoffen wie Kalzium liegt. Das deutet darauf hin, dass Molybdän in der Pflanze zu

einem Großteil - entsprechend seiner Hauptfunktion als essentieller Bestandteil von Enzymen - in organisch gebundener Form vorliegt und aus frischem organischem Material zunächst im Boden mineralisiert werden muss. Das würde erklären, warum in den eigenen Untersuchungen bei keiner der geprüften Leguminosen nach der Düngung von Pferdemist trotz vergleichsweise hoher Mo-Gehalte im Düngemittel eine erhöhte Mo-Aufnahme festgestellt werden konnte. Im Gegensatz dazu wurde in der Variante mit der Düngung von Grüngutkompost - insbesondere beim ersten Schnitt des Rotklees - in beiden Versuchsjahren ein gegenüber der Kontrolle signifikant erhöhter Mo-Gehalt in der Schnittgut-TM festgestellt. Daraus kann geschlossen werden, dass das Molybdän in biologisch umgesetzten organischen Materialien wie sie Komposte darstellen, überwiegend in mineralisierter Form, und somit rasch pflanzenverfügbar vorliegen.

Der eingesetzte Grüngutkompost in den eigenen Untersuchungen wies den höchsten Gehalt an Molybdän auf, wenn auch mit erheblichen Unterschieden zwischen den einzelnen Partien, was sich auch in den Angaben der zitierten Arbeiten zeigt (Tab. 29). Ein Vorteil der Verwendung von Kompost ist nicht ausschließlich in der direkten Nährstoffzufuhr zu sehen, sondern auch in einem hohen pH-Wert des Materials, welcher in Verbindung mit hohen Mo-Gehalten die oben genannten positiven Effekte hinsichtlich einer verbesserten Mo-Verfügbarkeit begünstigen kann. Dies vor allem mit Blick auf die versauernde Wirkung des Leguminosenanbaus auf den Boden durch:

- eine erhöhte Protonenabgabe als Ladungsausgleich aufgrund einer verstärkten Aufnahme an Kationen (MENGEL & STEFFENS 1982, BECKER 1984, HAUTER & STEFFENS 1985),
- die biologische Umsetzung von abgestorbenen Wurzelresten während der Vegetation verbunden mit der Umwandlung organischen Stickstoffs zu Nitrat, was zusätzliche Protonenfreisetzung bedeutet (SAUERBECK & JOHNNEN 1976, BECKER 1984) und
- die Abgabe von Protonen oder organischer Säuren durch die Wurzeln der Leguminosen aufgrund geringer Verfügbarkeit von Nährstoffen (LANDSBERG 1986, GERKE et al. 1994, JOHNSON et al. 1996)- vergl. auch im Abschnitt Phosphor in diesem Kapitel.

WARMAN (1987) konnte z.B. beim Anbau von Heidelbeeren (*Vaccinium angustifolium* Ait) - einer Kultur deren Sorten überwiegend an Böden mit niedrigen pH-Werten

angepasst sind (HALL et al. 1964, FINN et al. 1991) - den Mo-Gehalt in den oberirdischen Pflanzenteilen von 0,2 bis 0,6 mg kg⁻¹ TM (Kontrolle) mit einer kombinierten Düngung von Kalk und Molybdän auf 0,7 bis 1,6 mg kg⁻¹ TM signifikant erhöhen. Möglicherweise könnte der Einsatz von Kompost insbesondere auf leichteren Böden mit tendenziell niedrigem pH-Wert die Verfügbarkeit von Molybdän für die angebauten Kulturen deutlicher erhöhen, als das eine mineralische Düngung mit Molybdän allein vermag. Eine solche indirekte Wirkung ist nach den Ergebnissen von BESSHO & BELL 1992, YAN et al. 1996, MARSCHNER & NOBLE 2000, PAUL et al. 2001 und XU et al. 2006 für jede Form der Düngung mit Düngemitteln pflanzlichen Ursprungs denkbar, wenn sie auch in der vorliegenden Arbeit anhand der untersuchten Parameter bzw. der ermittelten Ergebnisse nicht erkennbar wurde. Demnach kann es durch die Einbringung von pflanzlichem Material aufgrund des Kationenüberschusses in der Biomasse zu einer alkalischen Wirkung im Boden kommen. NOBLE et al. (1996) stellte auch in den Blättern verschiedener Nadel- und Laubbaumarten einen Kationenüberschuss und eine alkalische Wirkung im Boden nach Ausbringung und Einarbeitung der Materialien fest. Vor diesem Hintergrund ist auch der Einsatz von Gehölzhäcksel langfristig positiv zu bewerten.

4.2 Effekte der Zufuhr hoher organischer Kohlenstoff- und Stickstoff-Mengen

Gehölzhäcksel

Aufgrund der hohen eingebrachten Mengen an Kohlenstoff in den Boden - verbunden mit einem weiten C/N-Verhältnis im organischen Material - in einer Größenordnung von 5 t ha⁻¹ C (Stroh mit einem C/N-Verhältnis von 81 und 95 zu Saatplatterbse 2008 und 2009) bzw. 10 t ha⁻¹ C (Gehölzhäcksel mit einem C/N-Verhältnis von 62 und 45 zu Rotklee und Ackerbohne) wurde eine temporäre Immobilisierung von mineralischem Stickstoff im Boden nach der Applikation und Einarbeitung der genannten Düngemittel erwartet. Unter Ackerbohne und Rotklee wurden im Jahr 2009 38 Tage und im Jahr 2010 42 Tage nach der Applikation der organischen Düngemittel signifikante Unterschiede der N_{min}-Mengen im Boden in einer Tiefe von 0 bis 30 cm festgestellt (Abb. 35). Dabei entsprachen die ermittelten Mengen an N_{min} zu diesem Zeitpunkt (Gehölzhäcksel < Pferdemist < Grüngutkompost) einer charakteristischen Abstufung entsprechend des C/N-Verhältnisses im gedüngten organischen Material (vergl. auch Abb. 17 und Abb. 18). Die Höhe des

N_{\min} -Vorrates im Boden in einer Tiefe von 0 bis 30 cm lag zu diesem Zeitpunkt nach der Düngung von Grüngutkompost um 10 bis 24 kg ha⁻¹ und in der Kontrolle um 4,6 bis 10 kg ha⁻¹ über dem Wert nach der Düngung von Gehölzhäcksel. Der in Abb. 35 dargestellte Verlauf des N_{\min} -Vorrates im Boden nach der Düngung von Gehölzhäcksel lässt darauf schließen, dass infolge des mikrobiellen Abbaus des organischen Materials im Zeitraum der Düngung bis zur Ernte der Leguminosen im Vergleich zur Kontrolle ohne Düngung und insbesondere gegenüber den Varianten mit Düngung von Pferdemist und Grüngutkompost mineralischer Stickstoff aus dem Boden entzogen wurde.

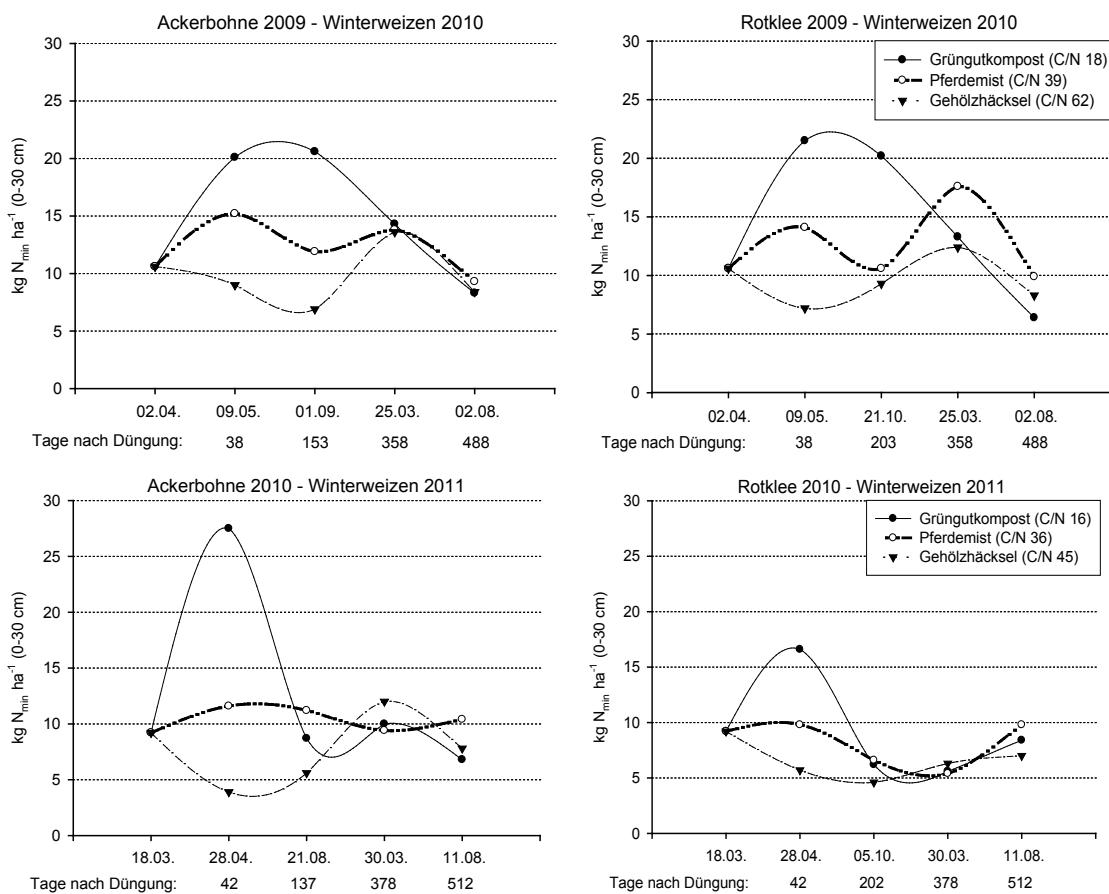


Abb. 35: N_{\min} -Vorrat im Boden in Abhängigkeit von der Düngung mit Grüngutkompost, Pferdemist und Gehölzhäcksel zu Ackerbohne und Rotklee in einer Tiefe von 0 bis 30 cm

Eine rasche Zunahme an mikrobieller Biomasse im Boden verbunden mit einer Aufnahme und zeitweiligen Festlegung von mineralischem Stickstoff nach der Zufuhr von organischem Material mit einem hohen Kohlenstoffanteil, zeigen auch Ocío et al. (1990) nach der Einarbeitung von 10 t ha⁻¹ Weizenstroh (mit Zugabe von 100 kg ha⁻¹

Ammoniumnitrat) in einem Feldversuch. Demnach verdoppelte sich innerhalb von 7 Tagen nach der Einarbeitung des Strohs die mikrobielle Biomasse im Boden in einer Tiefe von 0 bis 20 cm und in einem Zeitraum von 40 Tagen nach Düngung wurden etwa 30 kg ha^{-1} an mineralischem Stickstoff mikrobiell festgelegt. NIEDER & RICHTER (1986) ermittelten in einem Säulen-Brutversuch (Säulenhöhe 30 cm) eine Festlegung von umgerechnet $65 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ nach Einarbeitung von 8 t Weizenstroh je Hektar mit einem C/N-Verhältnis von 132 in einem Zeitraum von 14 Tagen. Nach der Zugabe von 8 t Stroh mit einem C/N-Verhältnis von 80 lag die Menge an festgelegtem N in der gebildeten mikrobiellen Biomasse bei 45 kg ha^{-1} . PARNAS (1975) beschreibt in einem theoretischen Modell den Abbau eingebrachter organischer Substanz in den Boden als Funktion des Wachstums der mikrobiellen Biomasse. Die Wachstumsrate der mikrobiellen Biomasse wird neben abiotischen Faktoren wie Temperatur, Wasser- und Sauerstoffgehalt im Boden (COLEMAN & JENKINSON 1999, DILLY 2000) im Wesentlichen von der Menge der eingebrachten organischen Substanz, dem Anteil und Polymerisationsgrad der enthaltenen Kohlenstoffverbindungen (TIAN et al. 1992, AJWA & TABATABEI 1994) und dem Verhältnis des enthaltenen Kohlenstoffs zum Stickstoff (C/N-Verhältnis) bestimmt (NIEDER & RICHTER 1986, NIEDER & RICHTER 1989, EILAND et al. 2001, CAYUELA et al. 2010). Daneben bestehen Effekte auf das Mikrobienwachstum durch die Verfügbarkeit essentieller Nährstoffe wie Phosphor, Kalium und Schwefel (SCHRÖDER & GEWEHR 1977, DEMETZ & INSAM 1999) und durch die Abgabe von Exsudaten aus Pflanzenwurzeln (CHENG & COLEMAN 1990).

Der Effekt der festgestellten N-Festlegung nach der Düngung von Gehölzhäcksel wurde bereits im Verlauf der Vegetationsperiode der Leguminosen aufgehoben und blieb weitestgehend auf den Bereich des Oberbodens (0 bis 30 cm) begrenzt, da die Einarbeitung der organischen Düngemittel sehr flach in einer Tiefe von 0 bis 15 cm erfolgte. Auch nach der Strohdüngung zu Saatplatterbse konnten zum Zeitpunkt der Ernte 96 bzw. 98 Tage nach Düngung keine Unterschiede hinsichtlich des N_{\min} -Vorrates im Boden festgestellt werden. Offenbar wurde sowohl nach der Düngung von Gehölzhäcksel als auch nach der Strohdüngung innerhalb der genannten Zeiträume das kritische C/N-Verhältnis im organischen Material, welches den Übergang der N-Festlegung zur N-Mineralisierung kennzeichnet, unterschritten.

Die Transformation der Kohlenstoffverbindungen im organischen Material folgt in Abhängigkeit von den oben genannten Faktoren einem typischen Verlauf, wobei die Abbaurate mit zunehmender Verweildauer des Materials im Boden in Form einer

logarithmischen Funktion abnimmt (JANSSEN 1984), was einem schnellen Abbau leicht umsetzbarer Kohlenstoff-Fraktionen ($\text{Glucose} < \text{Stärke} < \text{Zellulose} \leq \text{Hemizellulose}$) und einem langsamen Abbau schwer umsetzbarer Kohlenstoff-Fraktionen (Lignin) verbunden mit einem zeitlich begrenzten, hohen Bedarf an mineralischem Stickstoff entspricht (HARPER & LYNCH 1981). OCIO et al. (1990) stellten in ihren Untersuchungen mit Stroh nach 150 Tagen im Boden eine steigende N_{\min} -Menge fest, was auf eine Mineralisierung des zuvor gebundenen Stickstoffs zurückgeführt wurde. In den Versuchen von NIEDER & RICHTER (1986) wurde die Aufhebung der N-Festlegung im Boden zwischen dem 54. und 75. Tag nach der Strohdüngung festgestellt. Die Remineralisierung des festgelegten Stickstoffs setzte in diesem Versuch ein, sobald die Menge von 8 t ha^{-1} an eingearbeitetem Stroh ein C/N-Verhältnis von 35 unterschritt. NIEDER & RICHTER (1989) stellten in Untersuchungen zur Umsetzung von Weizenstroh in einem Mikroparzellen-Versuch (Versuchsboden: Löß-Braunerde-Pseudogley) fest, dass die Phase der Immobilisierung bei einem C/N-Verhältnis von kleiner 43 im organischen Material in eine Phase der Remobilisierung des zuvor festgelegten Stickstoffs übergeht. Von mineralischem Stickstoff als limitierenden Faktor beim Aufbau von Mikrobeneiweiß oberhalb eines C/N-Verhältnis von 22 bis 35 im eingebrachten organischen Material nach der Applikation und Einarbeitung verschiedener Erntereste in den Boden berichten auch KLIMANEK & SCHULZ (1997).

Der im Vorfeld der Untersuchungen erwartete erhöhte Anteil an symbiotisch fixiertem Stickstoff am Spross-N der Leguminosen, welcher sich auf einen verminderten N_{\min} -Vorrat im Boden nach Düngung von Stroh und Gehölzhäcksel zurückführen ließe, war weder bei der Saatplatterbse, noch bei Ackerbohne und Rotklee im Feldversuch erkennbar. Bei den beiden nichtlegumen Referenzkulturen zu Ackerbohne und Rotklee, Welsches Weidelgras und Spitzwegerich, ließen sich zudem nach der Düngung von Gehölzhäcksel keine negativen Wirkungen auf den Sprossertrag und die N-Aufnahme im Vergleich zur Kontrolle feststellen (Abb. 14, Abb. 16). Das bedeutet, dass die Verfügbarkeit von mineralischem Stickstoff im Boden in diesen Prüfgliedern trotz der ermittelten N-Immobilisierung nach der Düngung von Gehölzhäcksel offenbar nicht oder nur zeitlich und räumlich begrenzt eingeschränkt war.

Die sich nicht wesentlich unterscheidenden Anteile an bodenbürtigem Stickstoff am Spross-N der Leguminosen weisen darauf hin, dass der geringen Einarbeitungstiefe der Düngemittel im Bereich von 0 bis 10 cm und dem damit verbundenen geringen

räumlichen Bereich einer temporären N-Festlegung im Boden offenbar eine ausreichende Durchwurzelungstiefe der Pflanzen und damit die Möglichkeit der Aufnahme von Nährstoffen - insbesondere von Stickstoff - aus einer Bodentiefe unterhalb von 10 cm gegenüber stand. Bei einer Mächtigkeit des effektiven Wurzelraumes von 100 cm am Versuchsstandort und des arteigenen Durchwurzelungsvermögens der untersuchten Kulturen auf vergleichbaren Standorten (KUTSCHERA 2009) kann angenommen werden, dass die Wurzeltiefe der Pflanzen deutlich über den angegebenen Bereich der Ablage und Einarbeitung der organischen Düngemittel hinaus reichte. Eine deutliche Verminderung der N-Aufnahme von nichtlegumen Pflanzen nach der Düngung mit organischen Materialien mit einem weiten C/N-Verhältnis zeigt sich vor allem in Gefäßversuchen, in denen meist ein großer Teil oder das gesamte Bodenvolumen mit dem organischen Material durchmischt wurde (GÖK & OTTOW 1988). SCHERER & MENGEL (1981) stellten im Gefäßversuch nach der Einarbeitung von zerhackseltem Stroh einen Rückgang der Spross-TM von Welschem Weidelgras um 29 % und eine um 26 % geringere N-Aufnahme im Mittel von drei Schnitten gegenüber der Kontrolle ohne Strohdüngung fest. Inkubationsversuche mit der Zugabe von ¹⁵N-markiertem Kaliumnitrat zur Strohdüngung (SCHERER & MENGEL 1983) bestätigen die N-Festlegung im Boden und eine um 29 % geringere Spross-TM von Welschem Weidelgras im Mittel von zwei Schnitten und um 19 % geringere Spross-TM von Senf, verbunden mit einer deutlich geminderten N-Aufnahme gegenüber der Kontrolle ohne Strohdüngung. Es wurde festgestellt, dass nach 28 Wochen Inkubationszeit die im Boden vorliegende Menge an Nitrat-N nach der Strohdüngung gegenüber der Kontrolle deutlich reduziert war, gleichzeitig aber organische N-Formen in signifikant höherer Menge vorlagen. Daraus wurde geschlussfolgert, dass ein Teil des im Boden verfügbaren und des gedüngten mineralischen Stickstoffs direkt in die organische Substanz der am Strohabbau beteiligten Mikroorganismen eingebaut und ein Teil infolge des Strohabbaus in andere N-Formen transformiert wurde (α -Amino-N, Amino-Zucker-N, Amid-N, Hydrolysat-Rest-N). GUTSER & VILSMEIER (1985) ermittelten im Gefäßversuch ohne Zugabe von mineralischem Stickstoff um bis zu 31 % geringere N-Entzüge von Grünhafer und Grünmais nach der Düngung mit verschiedenen zerkleinerten Pflanzenresten (C/N-Verhältnis größer 57) gegenüber der Kontrolle und um bis zu 63 % geringere N-Entzüge gegenüber der Düngung mit organischem Material mit einem C/N-Verhältnis kleiner 20. Eine

deutlich geringere Differenzierung der Düngevarianten des Hafers zeigte sich dagegen unter Verwendung des identischen Pflanzenmaterials des Gefäßversuches im Feld. Hier wurden keine signifikanten Unterschiede des Kornertrages und des N-Entzugs nach der Düngung von jeweils 50 dt ha⁻¹ TM Stroh (Weizen, Ackerbohne, Mais, Kartoffelkraut) und anschließender flacher Einarbeitung in den Boden gegenüber der Kontrolle festgestellt (GUTSER & VILSMEIER 1985).

Der für den Aufbau des Mikrobeneiweißes benötigte Stickstoff insbesondere in der Phase zu Beginn des C-Abbaus in den gedüngten organischen Materialien stammt zu einem Teil aus dem eingebrachten organischen Material selbst, muss jedoch vor allem bei einem hohen Bedarf an Kohlenstoff - bei einem weiten C/N-Verhältnis oder hohen Anteilen an hochpolymeren Kohlenstoff-Verbindungen - von einer externen Quelle bezogen werden. Dabei kann neben der Ausnutzung der mineralisch vorliegenden N-Mengen im Boden und der aus einem natürlichen Mineralisierungsprozess pflanzenverfügbar werdenden N-Menge zusätzlich auch aufgrund der Düngung organisch gebundener Stickstoff mineralisiert werden. Dieser als Priming-Effekt bezeichnete Vorgang umfasst neben Stickstoff (KUZYAKOV et al. 2000) auch den in der organischen Substanz des Bodens gebundenen Kohlenstoff (DALENBERG & JAGER 1989), wobei die Mechanismen, die Priming-Effekte auslösen, nur zum Teil eindeutig geklärt sind (FONTAINE et al. 2003).

In den eigenen Untersuchungen können zu den genannten Ursachen des Ausbleibens deutlicher Wirkungen auf die N-Versorgung der untersuchten Kulturen andere, kurzfristig wirkende Effekte, wie etwa eine erhöhte Bodendurchlüftung aufgrund der Partikelstruktur des organischen Materials und ein erhöhter Wassergehalt des Bodens beigetragen haben.

TAUBNER et al. (1999) konnten nach der oberflächlichen Ausbringung von Gehölzhäckseln (C/N-Verhältnis 69) im Frühjahr in bestehende Getreidebestände an zwei Standorten in einer Abstufung der Aufwandmengen von 50, 100 und 150 m³ je ha (entspricht etwa 3,5, 7,0 und 10,5 t ha⁻¹ C) zeigen, dass bereits nach einmaliger Ausbringung höhere Kornerträge im selben Jahr erzielt werden können. So wurden bei Roggen auf einem Standort mit 88 % Sand- und 3 % Tonanteil im Boden im Ap-Horizont 17 bis 22 % höhere Kornerträge gegenüber der Kontrolle ohne Düngung erzielt. Auf einem Standort mit 30 % Sand- und 16 % Tonanteil wurden Korn-Mehrerträge von Weizen zwischen 6 und 11 % festgestellt. Im Folgejahr ohne Düngung wurden keine Ertragsunterschiede zwischen den Varianten (wie im Vorjahr

jeweils Roggen und Weizen) sichtbar. Nach erneuter oberflächlicher Applikation von Gehölzhäckseln (C/N-Verhältnis 54) im Frühjahr des dritten Versuchsjahres wurden bei Gerste auf dem Standort mit dem höheren Sandanteil im Ap-Horizont wiederum höhere Kornerträge im Bereich zwischen 6 und 27 % gegenüber der Kontrolle ohne Düngung festgestellt. Eine zusätzliche Düngung mit Gülle zur Vermeidung einer N-Festlegung im Boden zeigte in beiden Jahren der Ausbringung keine deutliche Ertragswirksamkeit gegenüber der Kontrolle ohne Güllendüngung. Die teils positiven Effekte auf den Kornertrag des Getreides insbesondere auf dem Standort mit dem höheren Sandanteil im Ap-Horizont des Bodens, wurden vor allem auf einen höheren Wassergehalt im Boden nach der oberflächlichen Ausbringung der Gehölzhäcksel zurückgeführt.

In den eigenen Untersuchungen wurde mit dem Gehölzhäcksel im Mittel der Jahre eine Menge von 192 kg ha⁻¹ N ausgebracht, von der durch Spitzwegerich (1,0 %) und Welschem Weidelgras (0,5 %) jeweils nur ein sehr geringer Anteil und durch Rotklee (-3,9 %) nichts aufgenommen wurde (Tab. 30).

Tab. 30: Scheinbare N-Ausnutzung von Saatplatterbse (SP), Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) und nachfolgendem Winterweizen, sowie von Welschem Weidelgras (WWG) und Spitzwegerich (SW) in Abhängigkeit von der Düngung mit Grüngutkompost, Pferdemist, Stroh und Gehölzhäcksel

Prüfglieder	Scheinbare N-Ausnutzung [%]					
	Leguminose			Referenzkultur		
	SP	AB	RK	WWG ¹	SW	WWG ²
Grüngutkompost	0,3	3,4	1,1	0,2	1,2	5,4
Pferdemist	6,4	-5,0	9,8	6,0	9,0	13,3
Stroh	7,0	-	-	11,0	-	-
Gehölzhäcksel	-	8,4	-3,9	-	1,0	0,5
Winterweizen						
Grüngutkompost	< 0	3,3	2,4	-	-	-
Pferdemist	17,0	2,5	3,9	-	-	-
Stroh	< 0	-	-	-	-	-
Gehölzhäcksel	-	3,6	2,5	-	-	-

gemittelte Werte von zwei Jahren ohne Unkraut, Bezugsgröße: Kontrolle, ¹ Welsches Weidelgras, Referenzkultur zu Saatplatterbse, ² Welsches Weidelgras, Referenzkultur zu Rotklee

Dies kann wahrscheinlich auf einen hohen Anteil ($> 90\%$) an organisch gebundenem Stickstoff am Gesamt-N (AMLINGER et al. 2003), dem weiten C/N-Verhältnis von 62 bzw. 42 und einer damit verbundenen geringen N-Mineralisierung (Abb. 17, Abb. 18). zurückgeführt werden. Insbesondere das Verhältnis von C_t zu N_t im Düngemittel hat einen signifikanten Einfluss auf den Zeitpunkt und die Höhe der Netto-Mineralisation des im Düngemittel enthaltenen Stickstoffs bzw. den Abbau des enthaltenen Kohlenstoffs (PESCHKE & DÖLLING, 1994, POPP et al. 1996, MARY et al. 1996, PROBERT et al. 2005). In zahlreichen Untersuchungen wurde zudem eine signifikant negative Korrelation zwischen dem Anteil an Lignin (Lignin/ N_t -Verhältnis) und Polyphenolen (FOX et al. 1990, PALM & SANCHEZ 1991, HANDAYANTO et al. 1994, CONSTANTINIDES & FOWNES 1994, MAFONGOYA et al. 1998, VAHDAT et al. 2011, CHALHOUB et al. 2013, MOHANTY et al. 2013) bzw. dem Anteil an Lignin und Cellulose (PAPE et al. 2000) am Dünger-C und dem Zeitpunkt und der Höhe der Netto-N-Mineralisation nachgewiesen.

HADAS et al. (2004) ermittelten im Rahmen von Inkubationsversuchen einen vollständigen mikrobiellen Abbau wasserlöslicher C-Anteile des Strohns verschiedener Pflanzenarten (Raps, Mais, Weizen, Tabak, Reis) nach etwa einer Woche und eine Abbaurate von nur 1 % des enthaltenen Lignins im Verlauf von 24 Wochen. OTTOW (2011) gibt in einer Übersicht aus verschiedenen Quellen für die Mineralisation von 50 % der eingebrachten organischen Substanz in Böden des gemäßigten Klimas einen Zeitraum von 3,5 Tagen für Einfachzucker, 8,6 bis 69 Tage für Cellulose und 69 bis 866 Tage für Lignin an. Da das in den eigenen Untersuchungen verwendete Häckselgut hauptsächlich aus verholztem Material von Nadelbäumen bestand, kann von einem hohen Anteil an Lignin an der TM ausgegangen werden. Nach FENGEL & WEGENER (1983) und HAIDER (1992) liegt der Anteil von Lignin in der TM der Nadeln von Nadelgehölz zwischen 14 und 20 %, im Holz bei 28% und in der Rinde bei 38 %, hingegen der Anteil von Gesamtstickstoff in der TM bei 0,1 %. Nach Düngung von Gehölzhäcksel betrug die scheinbare N-Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs durch den Winterweizen 3,6 % nach Vorfrucht Ackerbohne bzw. 2,5 % nach Vorfrucht Rotklee und war damit gegenüber der Vorfrucht und gegenüber den Referenzkulturen erhöht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine direkte Ausbringung des Gehölzhäcksel zum Winterweizen möglicherweise einen negativen Effekt auf die N-Verfügbarkeit im Boden und die Ertragsbildung des Weizens gehabt hätte. In der absoluten Höhe vergleichsweise geringe, gegenüber

der Kontrolle jedoch signifikant negative Effekte hinsichtlich einer N-Immobilisierung bzw. einer geringen N-Verfügbarkeit im Boden nach der Düngung von teils verholztem organischen Material mit einem weiten C/N-Verhältnis bestätigen andere Untersuchungen mit Gehölzhäcksel. Eine N-Immobilisierung in Höhe von 7 kg ha^{-1} bzw. 5,6 % des mit der Düngung von Gehölzhäcksel (C/N-Verhältnis 42) ausgebrachten Stickstoffs ($125 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) stellten BRANDT & WILDHAGEN (1999) im Zeitraum vom 20.03. bis 10.08. in einem Feldversuch fest. Eine N-Mineralisierungsrate zwischen -5 % (Immobilisierung in Höhe von $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) und 56 % des mit der Düngung verschiedener Arten von Gehölzhäcksel (blattreiches Material) zu Mais ausgebrachten Stickstoffs wiesen auch MAFONGOYA & NAIR (1997) unter semiariden Bedingungen in Abhängigkeit vom Ligningehalt und der Form der Einarbeitung des Häckselgutes nach. Auch nach der Düngung von Stroh mit einem vergleichsweise geringen Ligningehalt zwischen 5 und 20 % in der TM (VERONA 1971, HAIDER 1992, HENRIKSEN & BRELAND 1999), wird sowohl in Inkubationsversuchen (AZAM et al. 1990) als auch nach einmaliger Ausbringung (POWLSON et al. 1985) und nach langjährig wiederholter Düngung und Einarbeitung (TURLEY et al. 2003) von einem leichten Rückgang des Kornertrages der jeweils gedüngten Kultur berichtet, was auf eine nicht ausreichende N-Verfügbarkeit bzw. temporäre N-Immobilisierung im Boden zurückgeführt wird. PALM et al. (2001) kommen nach der Auswertung von 11 Inkubationsversuchen mit verschiedenen Pflanzenresten zu der Einschätzung, dass eine initiale Netto-N-Mineralisierung im Boden bei einem N_t -Gehalt von $> 2,5 \%$, einem Lignin-Gehalt von $< 15 \%$ und einem Polyphenolgehalt von $< 4 \%$ in der TM eines organischen Düngemittels zu erwarten ist.

Pferdemist und Grüngutkompost

Aus den höheren Entzügen an Stickstoff der Referenzkulturen Welsches Weidelgras von $19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (zu Saatplatterbse, Abb. 9), Spitzwegerich von $24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (zu Ackerbohne, Abb. 25) und Welschem Weidelgras von $35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (zu Rotklee, Abb. 26) nach der Düngung von Pferdemist gegenüber der Kontrolle lässt sich ableiten, dass im Vegetationszeitraum der Pflanzen ein erhöhtes N-Angebot im Boden in dieser Variante verfügbar war. Ein Einfluss der Zufuhr hoher organisch gebundener N-Mengen mit der Düngung von Pferdemist auf die symbiotische N_2 -Fixierung war jedoch bei den untersuchten Leguminosen nur tendenziell erkennbar (vergl. auch Abb. 9, Abb. 25 und Abb. 26). So ließ sich anhand der ermittelten

Ergebnisse vor allem bei der Saatplatterbse mit 34 % und beim Rotklee mit 25 % ein erhöhter N-Anteil aus dem Boden verbunden mit einem verminderten Anteil an symbiotisch fixiertem Stickstoff (66 % bzw. 75 %) am Spross-N der Pflanzen nach der Düngung von Pferdemist gegenüber der Kontrolle (jeweils 22 % bodenbürtig und 78 % luftbürtig) feststellen.

Eine deutlich verminderte symbiotische N_2 -Fixierung wird auch in der Literatur nur infolge einer vergleichsweise hohen Menge an gedüngtem mineralischem Stickstoff im Boden beschrieben. Über einen Rückgang des luftbürtigen Anteils am Spross-N in Rotklee nach N-Düngung in Form von Ammoniumsulfat gegenüber der Kontrolle ohne Düngung im Rahmen eines zweijährigen Feldversuches berichten z. B. BOLLER & NÖSBERGER (1994). Demnach sank der Anteil an symbiotisch fixiertem N am Spross-N nach der Zugabe von $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ im Mittel von sechs Zuchtlinien und drei Sorten des Rotklees auf 71 % und nach Zugabe von $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ auf 57 % gegenüber der Kontrolle mit 78 %, wobei die einzelnen Zuchtlinien unterschiedlich stark auf eine erhöhte N-Zufuhr reagierten. HARDARSON et al. (1984) konnten in Feldversuchen mit verschiedenen Sojabohnengenotypen einen Einfluss des Genotyps der Pflanze auf den Grad der Minderung des Anteils an Luftstickstoff im Spross nach N-Düngung nachweisen. So lag nach Prüfung von acht Sorten der Anteil an luftbürtigem Stickstoff am Spross-N nach der Düngung von $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ als Ammoniumsulfat im Bereich zwischen 11 und 26 % und sank nach der Düngung von $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ auf einen Anteil zwischen 0 und 12 %. MINCHIN et al. (1989) zeigen in Gefäßversuchen mit Phaseolus- und Vignabohne (*Phaseolus vulgaris* L. und *Vigna radiata* L.) eine signifikante Abnahme der Nitrogenaseaktivität in Abhängigkeit der Konzentration im Wurzelraum und dem Zeitraum der Anwesenheit von NO_3^- im Boden. Demzufolge ist die Aufnahme von Nitratstickstoff in geringer Konzentration ($\leq 5 \text{ mmol}$) auf den äußeren Bereich (Cortex) der Knöllchen beschränkt und mindert von dort aufgrund einer Reduzierung der Sauerstoffzufuhr an die Rhizobien in reversibler Form die Nitrogenaseaktivität (BECANA & SPRENT 1987, BECANA et al. 1988). Ist die Nitrat-Konzentration im Wurzelraum stark erhöht (10 bis 20 mmol) oder dauert über einen bestimmten Zeitraum ($> 7 \text{ d}$) an, gelangt es in zunehmendem Maß in den Bereich der aktiven Rhizobien, wo aufgrund der stattfindenden Nitratreduktase und gleichzeitig verminderten Nitritreduktase NO_2^- akkumuliert wird. Dies führt irreversibel zu einer beschleunigten Seneszenz der Knöllchen verbunden mit einem Rückgang der Nitrogenaseaktivität (BECANA et al. 1989). NELSON (1987) ermittelte

einen signifikant geringeren Leghämoglobingehalt in Knöllchen der Erbse (*Pisum sativum* L.) und eine um 58 bis 77 % verminderte Nitrogenaseaktivität (C_2H_2 -Reduktion) im Zeitraum von sieben Tagen nach steigender Konzentration an Ammoniumnitrat (1, 2 und 5 mmol) im Boden. SVENNING et al. (1996) berichten von einer sinkenden Knöllchen-TM von Weißklee (*Trifolium repens* L.) etwa acht Tage nach Düngung von Ammonium und Nitrat entsprechend einer Stoffmengenkonzentration von 20 mmol in der Bodenlösung in einem Gefäßversuch, wobei eine von vier Sorten nicht auf den erhöhten Gehalt an Ammonium und Nitrat im Boden reagierte. MACDUFF et al. (1996) bestätigen eine abnehmende Knöllchen-TM von Weißklee nach steigender Konzentration von Nitrat im Wurzelraum im Zeitraum von 10 bis 30 Tagen nach der Düngung und verweisen insbesondere auf ein signifikant abnehmendes Wurzel/Spross-Verhältnis der gedüngten im Vergleich zu den nicht gedüngten Pflanzen.

Die geringe scheinbare Ausnutzung zwischen 0,3 und 1,8 % des mit dem Grüngutkompost ausgebrachten Stickstoffs durch die Leguminosen (gedüngte N-Menge im Mittel der Partien: 523 kg ha⁻¹ zu Saatplatterbse und 585 kg ha⁻¹ zu Ackerbohne und Rotklee) führte in den eigenen Untersuchungen offenbar dazu, dass keine negativen Effekte in diesem Prüfglied hinsichtlich einer verminderten symbiotischen N₂-Fixierung erkennbar wurden (Tab. 30). Die gegenüber der Kompostdüngung vergleichsweise hohe scheinbare Ausnutzung des mit dem Pferdemist gedüngten Stickstoffs zwischen 5,9 und 6,8 % durch die Saatplatterbse und den Rotklee bzw. zwischen 6 und 13 % durch die Referenzkulturen verdeutlicht zudem die offenbar sehr geringe N-Freisetzung des Kompost-Stickstoffs. SCHAAF (1995) gibt für die Höhe des Anteils mineralischen Stickstoffs in 44 untersuchten Partien Grüngutkompost einen Mittelwert von 1,6 % des Gesamt-N an. In den untersuchten Bioabfallkomposten (n = 26) lag dieser Wert bei 7,1 % des Gesamt-N. Auf eine geringe Änderung des N_{min}-Vorrates im Boden verschiedener Bodentypen (Braunerde, Parabraunerde und Podsol) nach der Applikation von Kompost (Bioabfall und Grünschnitt) verweisen auch BAHRENBERG et al. (2003). Nach zweijähriger Ausbringung von Frisch-, und Fertigkompost, mit welchen Stickstoffmengen zwischen 689 und 700 kg ha⁻¹ ausgebracht wurden, konnte im Boden keine signifikante Änderung des Gesamt-Stickstoffvorrates nachgewiesen werden. Die mit 7 bis 21 kg ha⁻¹ N nur leicht erhöhten Mengen an löslichem Stickstoff (Ammonium und Nitrat) nach Kompostdüngung gegenüber der Kontrolle lassen auch in diesen

Untersuchungen eine sehr geringe N-Freisetzung aus den verwendeten Komposten erkennen. Die bei der Kompostierung erfolgten mikrobiellen Ab- und Umbauprozesse der im Ausgangsmaterial enthaltenen organischen Substanz führen in Abhängigkeit von der Dauer der Kompostierung und einer ausreichenden Sauerstoffzufuhr dazu, dass im Endprodukt nur noch geringe Anteile an leicht abbaubaren organischen Verbindungen vorliegen (GARCIA et al. 1991, FRANCOU et al. 2008). Die im Kompost enthaltenen organischen Verbindungen sind demzufolge stabil (humifiziert) und damit weitestgehend gegen weiteren mikrobiellen Abbau geschützt (KÖGEL-KNABNER 2010). Demzufolge ist vor allem die Stabilität der im Kompost enthaltenen C- und N-Verbindungen in Abhängigkeit vom Reifegrad für die N-Freisetzung im Boden maßgebend. BERNAL et al. (1998) zeigen in Kompostiersversuchen mit unterschiedlich kombinierten Ausgangsmaterialien pflanzlicher und tierischer Herkunft einen in den Phasen der Kompostierung (1) initiale Umsetzung, (2) Erhitzung, (3) finale Umsetzung und (4) Reifung zunehmenden Ligningehalt zwischen 28 und 59 % in der Frischmasse. In anschließenden Inkubationsversuchen wurde eine signifikant abnehmende C-Mineralisierung mit zunehmender Dauer der Kompostierung nachgewiesen. Auch ASCHE & STEFFENS (1994) stellten in Inkubationsversuchen mit Bioabfall-Kompost deutliche Unterschiede hinsichtlich der Freisetzung an mineralischem Stickstoff in Abhängigkeit vom Reifegrad der geprüften Komposte fest. Nach einer Inkubationszeit von 84 Tagen wurden weniger als 3 % des Kompost-N bei Fertigkompost (Alter: 15 Wochen, C/N-Verhältnis 11) mineralisiert, während bei Frischkompost (Alter: 5 Wochen, C/N-Verhältnis 16) mineralischer Stickstoff in Höhe von 2 % des Kompost-N festgelegt war. BRANDT & WILDHAGEN (1999) stellten in einem Feldversuch und in einem Zeitraum von 144 Tagen eine Mineralisation von 6,4 % des mit der Düngung von Bioabfallkompost ausgebrachten Stickstoffs in Höhe von 125 kg ha⁻¹ N fest (C/N-Verhältnis 12 im Kompost, Kultur: Winterweizen). Einer niedrigen Mineralisierung folgt eine entsprechend geringe Ausnutzung des ausgebrachten organisch gebundenen Stickstoffs. Einige Autoren geben daher ausschließlich die scheinbare N-Ausnutzung an. HARTL & ERHART (2005) ermittelten im Rahmen eines zehnjährigen Feldversuches mit der jährlichen Applikation von Bioabfallkompost in Höhe von 78, 138 und 198 kg ha⁻¹ N (Anteil N_{min} am N_t < 4 %) zu Roggen, Kartoffel, Winterweizen, Hafer und Dinkel eine scheinbare N-Ausnutzung von 7, 4 und 3 % im Mittel der Jahre und Kulturen. Eine scheinbare N-Ausnutzung durch Mais in Höhe von 6 % im Mittel von vier Jahren nach Düngung von Kompost

wiesen NEVENS & REHEUL (2003) in einem Feldversuch nach. Die mit dem Kompost (nur pflanzliches Ausgangsmaterial, C/N-Verhältnis 9 bis 11) ausgebrachte N-Menge betrug im Mittel 334 kg ha^{-1} . Im ersten Versuchsjahr wurde nach der Kompostausbringung eine N-Immobilisierung in Höhe von 4 % der gedüngten N-Menge festgestellt.

Sowohl bei Spitzwegerich als auch bei Welschem Weidelgras in den Jahren 2009 und 2010 wurde gegenüber der Kontrolle und vor allem gegenüber den Varianten Pferdemist und Grüngutkompost nach Düngung von Gehölzhäcksel eine gleich hohe bzw. eine tendenziell leicht geringere Spross-TM ermittelt. Bei den N-Entzügen der beiden Kulturen zeigte sich ein analoges Bild. Bei Ackerbohne und auch bei Rotklee wurde demgegenüber in beiden Jahren im Vergleich zur Kontrolle jeweils eine tendenziell höhere Spross-TM festgestellt. Das zeigt, dass die Leguminosen damit in einem gewissen Maß unabhängig vom N-Angebot im Boden waren und die Ausbringung des Gehölzhäcksel zu Ackerbohne und Rotklee vor diesem Hintergrund einen Vorteil darstellte. Darüber hinaus lag in zwei Jahren der Kornertrag des Weizens nach der Düngung von Gehölzhäcksel im Mittel der Vorfrucht (Ackerbohne und Rotklee) auf dem Niveau der Kontrolle, während die scheinbare N-Ausnutzung gegenüber dem Jahr der Ausbringung dieser Düngemittel erhöht war und sich nicht von den Varianten Pferdemist und Grüngutkompost unterschied.

Sehr geringe oder gar negative Ertragseffekte werden in anderen Untersuchungen vor allem bei nichtlegumen Kulturen nach der Düngung von organischem Material mit einem weiten C/N-Verhältnis wie Stroh oder Gehölzhäcksel, aber auch teilweise nach der Ausbringung von Kompost und Mist beschrieben. Hierbei wird als Grund bei den letztgenannten Düngemitteln zumeist ein erhöhter N-Bedarf zum Aufbau einer stark ansteigenden mikrobiellen Biomasse angegeben. Auch bei der Zufuhr hoher Mengen an organisch gebundenem Stickstoff ($> 300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) kann nur begrenzt von einer raschen Netto-N-Mineralisierung bzw. einer direkten Nährstoffwirkung ausgegangen werden (PROBERT et al. 2005, AZEEZ & VAN AVERBEKE 2010). Auch NETT et al. (2010) verweisen nach Untersuchungen nach 18-jähriger Mistdüngung ($30 \text{ und } 60 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ FM}$) vor allem auf eine langfristige Akkumulation von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden und bestätigen eine nur sehr geringe kurzfristige N-Düngewirkung. Durch die Zugabe von mineralischem Stickstoff in ausreichender Menge zu organischen Düngemitteln kann ein temporär hoher N-Bedarf im Boden infolge der mikrobiellen Ab- und Umbauprozesse gedeckt werden und die Netto-N-

Mineralisierung und daraus resultierend die Ausnutzung des Düngestickstoffs verbessert werden (BRANDT & WILDHAGEN 1999, NEVENS & REHEUL 2003). GENTILE et al. (2008) zeigten in Inkubationsversuchen eine signifikante Erhöhung der Mineralisierung des düngerbürtigen Stickstoffs um 28 % nach einer N-Ausgleichsdüngung zu Maisstroh gegenüber der Einbringung von Maisstroh ohne N-Zugabe. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Menge des eingebrachten N_{\min} im Mittel von vier Bodentypen um 47 % verringerte. PESCHKE & DÖLLING (1994) wiesen nach 111 Tagen Inkubationszeit von Stroh verschiedener Getreidearten (Mais, Roggen, Hafer) eine Mineralisierung von 7 % des im Stroh enthaltenen Stickstoffs im Mittel der Düngevarianten nach. Nach Zugabe von Ammoniumsulfat lag die N-Mineralisierungsrate bei 12 %. Ertragseffekte bei verschiedenen Kulturen zeigten sich in einem 20-jährigen Feldversuch nach Strohdüngung (Abstufung ein-, zwei- und dreimalige Ausbringung in vierjähriger Fruchtfolge, PECHER 1996). Eine N-Düngung zum Zeitpunkt der Stroheinarbeitung in Höhe von 30 und 60 kg ha⁻¹ N ergab einen signifikant höheren Ertrag an Spross-TM im Mittel der Fruchtfolgen von 1,8 dt ha⁻¹ a⁻¹. TIMMERMANN & KLUGE (1996) stellten nach Düngung von Gehölzhäcksel (C/N-Verhältnis 50 bis 80) einen verminderten Kornertrag von Mais und Weizen fest. Mit einer zusätzlichen mineralischen N-Düngung in Höhe von 100 % der optimalen N-Menge wurde ein gleich hoher Kornertrag wie in der Variante mit N-Düngung aber ohne organische Düngung erzielt. PETERSEN (1996) ermittelte in zehnjährigen Versuchen mit einer Aufwandmenge von 30 t ha⁻¹ a⁻¹ FM an Rindermistkompost tendenziell geringere Erträge gegenüber einer Kontrolle ohne Düngung und mit einer Aufwandmenge von 60 t ha⁻¹ a⁻¹ FM Erträge zwischen 90 und 110 % des Ertrages der Kontrolle. Nach Zugabe von Hornmehl und einem PK-Dünger zum Kompost wurden Mehrerträge von bis zu 150 % des Ertrages der Kontrolle erzielt.

4.3 Die Aufnahme von Kohlenstoff aus organischen Düngemitteln

Der in den eigenen Untersuchungen und in den Untersuchungen anderer Autoren (LEMMERMANN & WIEßMANN 1924, SCHAFFER 1954, AJWA & TABATABEI 1994, VANLAUWE et al. 2005, MALLORY & GRIFFIN 2007) nachgewiesenen verstärkten CO₂-Entbindung aus dem Boden nach organischer Düngung bzw. dem Einbringen organischer Substanz in den Boden, steht im Ackerbau unter bestimmten Umweltbedingungen (geschlossener Pflanzenbestand, hohe Sonneneinstrahlung, optimaler

Temperaturbereich) einem möglichen Mangel der Pflanzen an CO₂ bei hoher Assimilationsleistung gegenüber. HUBER (1952a) wies im Tagesgang erhebliche Schwankungen des CO₂-Gehaltes der Luft unmittelbar übereinem Weizenbestand (Messhöhe: 1,2 m) im Zeitraum Juni bis Juli nach. Demzufolge lag der CO₂-Gehalt über dem Bestand in der Nacht zwischen 395 und 500 ppm (03:00 Uhr) und am Tag bei hoher Lufttemperatur und Strahlungsintensität zwischen 270 und 330 ppm (12:00 Uhr). Diese Schwankungen waren in abgeschwächter Form und zeitverzögert noch in verschiedenen Zonen zwischen 4,5, 22,5, 50 und 100 m über dem Bestand nachweisbar. Auch Moss et al. (1961) beschreiben eine Anreicherung an CO₂ in 1,5 m Höhe über dem Boden in einem geschlossenem Maisbestand (Messungen im Zeitraum August bis September) in der Zeit zwischen 03:00 und 05:00 Uhr nachts auf einen CO₂-Gehalt der Luft zwischen 350 und 390 ppm, während tagsüber in der Zeit zwischen 10:00 und 17:00 Uhr bei hoher Strahlungsintensität Werte zwischen 250 und 270 ppm gemessen wurden. MÜLLER-STOLL & GRABERT (1970) ermittelten in einer Höhe von 1,5 m über dem Bestand von Kartoffelpflanzen im Mittel der durchgeführten Messreihen maximale Schwankungen des CO₂-Gehaltes zwischen 310 ppm im Zeitraum 0:00 bis 02:00 Uhr und kleiner 240 ppm im Zeitraum 14:00 bis 17.00 Uhr.

Vor dem Hintergrund des Ausgleichs eines möglicherweise verminderten CO₂-Gehaltes der Luft in einem stark CO₂-assimilierenden Pflanzenbestand war es das Ziel der eigenen Untersuchungen, zu prüfen, ob und in welchem Umfang die Leguminosen düngerbürtigen Kohlenstoff im Vegetationszeitraum aufnehmen. In Kapitel 4.3.1 werden insbesondere die Ergebnisse zur Bodenatmung und zur aufgenommenen Menge an düngerbürtigem Kohlenstoff diskutiert. In Kapitel 4.3.2 wird noch einmal gesondert auf die in den Untersuchungen angewandte Methodik zur Quantifizierung der Kohlenstoffaufnahme eingegangen.

4.3.1 Bodenatmung und düngerinduzierte Kohlenstoff-Aufnahme

Die Bodenatmung als Maß der aeroben Atmungsaktivität im Boden (GISI et al. 1997, KUZYAKOV 2006) bzw. als Indikator für das Prozessgeschehen des Kohlenstoff-Umsatzes in Böden (WEIGEL et al. 2006) und als Größe für die Berechnung der C-Mineralisierung (VANLAUWE et al. 2005) wurde in der vorliegenden Arbeit als indirekter, qualitativer Nachweis der Mineralisierung der ausgebrachten organischen Düngemittel ermittelt. Dabei ist davon auszugehen, dass die erfasste Gesamtmenge

an entbundenem CO₂ aus dem Boden unterschiedlichen Ursprungs entstammte und mit der angewandten Messmethode nicht unmittelbar der eigentlichen Herkunft zugeordnet werden kann. Unterschieden wird prinzipiell zwischen autotropher und heterotropher CO₂-Quelle (HAHN et al. 2006). KUZYAKOV (2006) unterscheidet noch einmal genauer zwischen der Wurzelatmung (autotroph) und der CO₂-Entbindung aus der zum größten Teil mikrobiellen Zersetzung von Wurzelexsudaten, abgestorbenen Pflanzenresten, der organischen Bodensubstanz und dem als Priming-Effekt bezeichneten wurzelinduzierten, zusätzlichen Abbau organischer Bodensubstanz (heterotroph). Nach OTTOW (2011) vermindert sich die Bodenatmung ohne den Einfluss von Düngung und Bodenbearbeitung eines Ackerbodens bis zu einem standortspezifischen Fließgleichgewicht zwischen dem Abbau und der Zufuhr von Kohlenstoff. Die im Fließgleichgewicht eines Bodens auftretende CO₂-Entbindung bezeichnet er als Basalatmung. Diese nimmt im Vergleich zur Wurzelatmung einschließlich der wurzelinduzierten Atmung einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamt-Bodenatmung ein. HASSE & KIRCHMEYER (1927) schätzen den Anteil der wurzelbeeinflussten CO₂-Entbindung aus Ackerböden nach Untersuchungen mit Luzerne auf etwa 80 %, SAUERBECK & JOHNNEN (1976) nach Untersuchungen mit Senf und Weizen auf über 75 %. WERTH et al. (2006) ermittelten beim Anbau von Mais (ohne organische oder mineralische Düngung) einen Anteil der wurzelbeeinflussten Atmung an der Gesamtatmung zwischen 83 und 91 %.

Die Erfassung der CO₂-Entbindung aus dem Boden in Saatplatterbse (2008), zu Ackerbohne (2009 und 2010) und Rotklee (2011 und 2012) erfolgten nicht kontinuierlich, sondern unregelmäßig zu einzelnen Terminen im Vegetationszeitraum der Leguminosen (vergl. auch Tab. A 44). Zudem entstammen die gemessenen Werte Momentaufnahmen und geben deshalb lediglich einen Anhaltspunkt dafür, wie hoch die CO₂-Freisetzung jeweils im gesamten Tagesverlauf war. Da die Bodenatmung in großem Maße von der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte abhängig ist (LUPWAYI et al. 1998, NAKADAI et al. 1996) und daraus resultierend von der Jahreszeit und dem Tagesgang (KOCH 1957, DING et al. 2007, RICHTER 1971, WILDUNG et al. 1975), können anhand der Messwerte keine Aussagen zur Gesamt-CO₂-Entbindung aus dem Boden im Versuchszeitraum gemacht werden. Auch KRZYSCH (1962) weist in seinen Untersuchungen auf eine signifikante Korrelation zwischen Bodentemperatur und Bodenatmung und infolge dessen auf deutliche Unterschiede hinsichtlich der Höhe der Bodenatmung im Tagesgang hin.

Die ermittelten Ergebnisse zu Saatplatterbse und Ackerbohne lassen erkennen, dass die Bodenatmung im Mittel der Termine insbesondere nach organischer Düngung signifikant gegenüber der Kontrolle erhöht war (Tab. 11, Tab. 19). Signifikante, aber in der Höhe vergleichsweise geringe Unterschiede wurden bei der Düngung von Stroh zu Rotklee in den Jahren 2011 (Differenz im Mittel von 8 Terminen: $110 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$) und 2012 (Differenz im Mittel von 15 Terminen: $46 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$) festgestellt (Tab. 26). In den organisch gedüngten Varianten der Saatplatterbse, der Ackerbohne und des Rotklee erhöhte sich somit die CO_2 -Freisetzung aus dem Boden in Abhängigkeit des eingearbeiteten Düngemittels im Mittel auf das 1,2 bis 1,8-fache gegenüber der Kontrolle ohne Düngung. In den Jahren 2011 und 2012 lag unter Rotklee die Bodenatmung nach Strohdüngung um den Faktor 1,05 bis 1,2 über der Kontrolle. RÜSCH (1955) gibt an, dass die durch Assimilation der Pflanzen benötigte Menge an CO_2 je Tag die aus Bodenatmung freigesetzte Menge etwa um das 3-fache übersteigt. Nach MOSS et al. (1961) entspricht vor allem bei einer hohen Lichteinstrahlung die Netto- CO_2 Assimilation der Pflanzen dem 5 bis 20-fachen der CO_2 -Freisetzung aus der Bodenatmung und weist in diesem Zusammenhang auf die vermutlich geringe Aufnahme des freigesetzten CO_2 hin. Auch LEMMERMANN & ECKL (1924) und BAEUMER (1992) schätzen die Nutzung des bodenbürtigen CO_2 insbesondere bei einer hohen Assimilationsrate als gering ein. Auf einen „ CO_2 -Düngeeffekt“ im Sinne einer positiven Reaktion von Kulturpflanzen hinsichtlich der Korn oder Spross-TM (WOLFE & ERIKSON 1993) nach organischer Düngung wird vor allem in älteren Quellen hingewiesen, jedoch ohne einen direkten Nachweis der genauen Menge an aufgenommenem Dünger-C zu liefern (FISCHER 1920, NIKLAS et al. 1925, KEUHL 1926, REINAU 1926, OEHLER 1930). Mit der Düngung von ^{13}C -markiertem Stroh wurde in der eigenen Arbeit deshalb erstmals eine direkte Rezyklierung des ausgebrachten Dünger-Kohlenstoffs durch den Rotklee nachgewiesen, welche in der Form in der Literatur noch nicht beschrieben ist. Die aus den einzelnen Schnitten kumulierten Anteile an strohbürtigem Kohlenstoff im Rotklee lagen bei 3,7 % im Gewächshaus (Tab. 25) und bei 0,5 % im Freiland (Tab. 27). Die Höhe des ermittelten Anteils von düngerbürtigem Kohlenstoff am Spross-C des Rotklee unter Feldbedingungen lässt nicht darauf schließen, dass von einem „ CO_2 -Düngeeffekt“ im eigentlichen Sinne ausgegangen werden kann. Dieser wird vor allem nach längerfristig einwirkender Erhöhung des CO_2 -Partialdruckes bzw. des CO_2 -Gehaltes der unmittelbaren Umgebungsluft der Pflanzen sowohl in

Klimakammer-Versuchen, als auch im Rahmen von FACE-Versuchen (Free Area Carbon dioxide Enrichment) beschrieben. Demnach wurde nach einem längerfristig erhöhten CO₂-Gehalt der Umgebungsluft der untersuchten Pflanzen ein erhöhter Anteil an Feinwurzelmasse (VAN VUUREN et al. 2000, VAN GINKEL 2000) und eine Erhöhung der Spross-TM zwischen 11 und 15 % bei Ackerkulturen (WEIGEL et al. 2006, CHENG & JOHNSON 1998) und bis zu 25 % bei Gehölzen/Bäumen (SCHLESINGER & LICHTER 2001) festgestellt. Berichtet wird auch von einer tendenziell erhöhten N₂-Fixierung im Bereich zwischen 6 und 20 % bei Weißklee (SOUSSANA & HARTWIG 1995, ZANETTI et al. 1996, HARTWIG et al. 2000) und von Luzerne (LÜSCHER et al. 2000), was vor allem auf einen steigenden Anteil von leicht löslichen Kohlenstoffverbindungen in der Pflanze, einem erhöhten N-Bedarf und einer daraus resultierenden verminderten N-Verfügbarkeit im Boden zurückgeführt wird (RYLE et al. 1992, SOUSSANA & HARTWIG 1995, CHENG & JOHNSON 1998, HUNGATE et al. 1999, HARTWIG et al. 2000, LÜSCHER et al. 2000). In diesem Zusammenhang verweisen auch STITT & KRAPP (1999) und AINSWORTH & LONG (2005) in ihren Auswertungen zahlreicher Veröffentlichungen zu den Effekten einer erhöhten CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft verschiedener Kulturpflanzenarten auf den geringeren Umfang bzw. das Ausbleiben ertragssteigernder Effekte (Erhöhung von Spross- und Wurzelmasse) aufgrund einer möglichen N-Limitierung und daraus resultierender Vorteile von Leguminosen gegenüber nichtlegumen Kulturen. JABLONSKI et al. (2002) zeigen im Rahmen einer Meta-Analyse von 159 Veröffentlichungen zu FACE-Versuchen mit 79 Kultur- und Wildpflanzenarten, den Umfang der Reaktion der untersuchten Pflanzen hinsichtlich der Bildung von vegetativer Biomasse sowie Früchten und Samen auf eine steigende CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft in der Reihenfolge C₄-Pflanzen < C₃-Pflanzen < Leguminosen.

In den eigenen Untersuchungen wurde nach Strohdüngung jeweils ein erhöhter Schnittgutertrag des Rotklee gegenüber der Kontrolle ohne Düngung festgestellt. Dieser lag im Gewächshaus im Mittel der Varianten ohne und mit ¹³C-Markierung um 18 % und im Freiland um 19 % (2011) bzw. 44 % (2012) über dem Schnittgut-Ertrag des Rotklee in der Kontrolle (Abb. 30 und Abb. 33). Mit den Messungen der Bodenatmung konnte nach der Düngung von Stroh eine im Mittel der Messtermine um 19 % (2011) bzw. 5 % (2012) signifikant erhöhte CO₂-Entbindung aus dem Boden gegenüber der Kontrolle ermittelt werden. Der direkt nachgewiesene Anteil an aufgenommenem Kohlenstoff aus dem gedüngten Stroh durch den Rotklee in Höhe

von 0,5 % im Freiland war demgegenüber vergleichsweise gering. Anzunehmen ist, dass ein Teil des aus dem Boden freigesetzten Kohlenstoffs nicht aus dem Stroh direkt stammt, sondern aus der biologischen Umsetzung von Kohlenstoff der organischen Substanz des Bodens aufgrund des bereits genannten Priming-Effekts (DALENBERG & JAGER 1989, FONTAINE et al. 2003). Da mit Hilfe der angewandten Methodik ausschließlich der ^{13}C -markierte Kohlenstoff aus dem gedüngten Stroh im Schnittgut des Rotklees erfasst wurde, kann es an dieser Stelle zu einer Unterschätzung der freigesetzten CO_2 -Mengen aus dem gedüngten Stroh und der Nutzung durch den Rotklee gekommen sein. Darüber hinaus wurde in den vorliegenden Untersuchungen keine Analyse der Wurzelmasse des Rotklees durchgeführt. Damit konnten auch keine Erkenntnisse über die insgesamt aufgenommene Menge an strohbürtigem Kohlenstoff gewonnen werden, was ebenfalls eine Unterschätzung der aufgenommenen Stroh-C-Menge bedeutet. CIERESZKO et al. 1996 ermittelten bei Phaseolusbohne eine Translokation des assimilierten Kohlenstoffs in die Wurzel im Bereich zwischen 17 und 18 % bereits innerhalb der ersten 16 Tage nach der Keimung der Pflanzen. Bei verringerter P-Verfügbarkeit im Boden erhöhte sich die Translokationsrate in dieser Untersuchung auf 22 bis 30 % des assimilierten Kohlenstoffs. HARDIE & LEYTON (1981) stellten ein Wurzel/Spross-Verhältnis von Rotklee im Bereich zwischen 0,92 und 0,98 fest, was auf eine fast gleich hohe Menge an Kohlenstoff in der Wurzel gegenüber dem Spross des Rotklees hindeutet. Auch in dieser Untersuchung wurde eine Reaktion der Pflanzen in Form eines geringeren Wurzel/Spross-Verhältnisses von 0,85 aufgrund einer verminderten P-Verfügbarkeit im Boden festgestellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich die geschätzte Aufnahmemenge an strohbürtigem Kohlenstoff durch den Rotklee in den eigenen Untersuchungen bei Einbeziehung der Wurzeln möglicherweise um bis zu fast 100 % erhöhen würde.

4.3.2 Methodik zur Quantifizierung der Kohlenstoff-Aufnahme

Ziel war es, mittels der natürlichen Häufigkeiten stabiler ^{13}C -Isotope, bei Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee die Aufnahme an düngerbürtigem Kohlenstoff zu quantifizieren. Grundlage der Methodik ist die Verschiebung des Isotopenverhältnisses $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in organischen Materialien durch die Diskriminierung bzw. Fraktionierung der hinsichtlich der Atommasse schwereren ^{13}C -Isotope gegenüber den relativ leichteren ^{12}C -Isotopen (WINKLER & SCHMIDT 1980) sowohl bei

chemischen Reaktionen (LLOYD & FARQUHAR 1994, SCHMIDT & GLEIXNER 1998) als auch bei physikalischen Vorgängen (FARQUHAR et al. 1989, O'LEARY 1981). Der durch Fraktionierung im Zuge von Stoffwechselprozessen hervorgerufene Grad der Abreicherung an ^{13}C in Pflanzen gegenüber der Atmosphäre ist für unterschiedliche Formen der C-Assimilation (C_3 , C_4 , CAM) typisch (SMITH & EPSTEIN 1971). So liegt der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von Luft bei etwa -7 ‰, der von C_3 -Pflanzen im Bereich von etwa -27 ‰ und der von C_4 -Pflanzen bei etwa -12 ‰ gegenüber einem festgelegten Standard in Form eines fossilen Calciumcarbonates aus South Carolina (PDB -Pee Dee Belemnite). Der Standard weist den Wert 0 ‰ auf (CRAIG 1953, CRAIG 1957, SMITH & EPSTEIN 1971). Genutzt werden die unterschiedlichen Isotopensignaturen im Rahmen der pflanzenbaulichen und bodenkundlichen Forschung unter anderem in Untersuchungen zu Umsatzgeschwindigkeit und Verweildauer von Kompartimenten eingebrachter C_4 -Pflanzenreste in Böden mit langjährigem und durchgehendem Anbau von C_3 -Pflanzen und umgekehrt (BALESDENT et al. 1987, MARY et al. 1992, CHENG 1996, CHENG & JOHNSON 1998, JOHN et al. 2004, WERTH et al. 2006). Zum Nachweis der dünggebürtigen C-Aufnahme in den eigenen Untersuchungen sollte der aus den Düngemitteln freigesetzte und von den Pflanzen assimilierte Kohlenstoff die natürliche Abreicherung im Spross der Leguminosen verstärken. Anhand einer signifikanten Abreicherung an ^{13}C -Isotopen im Spross des Rotklees in den gedüngten Varianten gegenüber der ungedüngten Kontrolle sollte der strohbürtige Kohlenstoffanteil zu bestimmen sein. Voraussetzung dafür ist die natürliche ^{13}C -Abreicherung des organischen Düngemittels verbunden mit einer zusätzlichen Abreicherung des freigesetzten Boden- CO_2 , welche aufgrund unterschiedlicher Diffusionskoeffizienten des $^{13}\text{CO}_2$ im Vergleich zu $^{12}\text{CO}_2$ im Boden zu verzeichnen ist (CERLING et al. 1989). Eine signifikante ^{13}C -Abreicherung gegenüber den Pflanzen in der Kontrolle und darüber hinaus auch gegenüber dem gedüngten organischen Material konnte ausschließlich im Spross von Rotklee nach Düngung von Pferdemist und Gehölzhäcksel im Jahr 2009 ermittelt werden (Tab. 21). Sowohl bei der Saatplatterbse und der Ackerbohne als auch beim Rotklee im Jahr 2010 waren die ermittelten natürlichen Häufigkeiten an ^{13}C -Isotopen der Pflanzen in den gedüngten Varianten nicht eindeutig zu interpretieren, was auf eine nicht ausreichend große Differenz zwischen der ^{13}C -Abreicherung der Düngemittel und der gedüngten Pflanzen bzw. zwischen gedüngter und ungedüngter Pflanze zurückzuführen ist. Um eine eindeutigere, d.h. bei den untersuchten Kulturen in beiden Versuchsjahren

gleichermaßen hohe und reproduzierbare ^{13}C -Abreicherung nach organischer Düngung gegenüber der Kontrolle mit Hilfe der natürlichen ^{13}C -Häufigkeiten zu erreichen, müsste vor allem ein weitestgehender Ausschluss unterschiedlicher Bedingungen im Boden (Temperatur und Feuchte) im Verlauf des Wachstums der Pflanzen gewährleistet sein. Auf diese Weise wäre der für die Untersuchungen störende Einfluss der zeitlich differenzierten Umsetzung unterschiedlicher C-Fractionen (Glucose, Zellulose, Lignin) - verbunden mit jeweils unterschiedlichen ^{13}C -Signaturen (BENNER et al. 1987, WEDIN et al. 1995, SCHWEIZER et al. 1999, PENNING & CONRAD 2006) - im Boden deutlich verringert. Zudem wäre auf diese Weise eine gewisse Anpassung der Stroh-Umsetzung bzw. der CO_2 -Entbindung aus dem Boden an die Assimilationsleistung der Pflanzen möglich.

Mit Hilfe von ^{13}C -markiertem Stroh wurden in den Untersuchungen mit Rotklee in den Jahren 2011 und 2012 deutlich bessere Ergebnisse gegenüber dem Vergleich der natürlichen ^{13}C -Isotopensignatur erzielt. Die ermittelte strohbürtige Kohlenstoff-Aufnahme des Rotklees unterschied sich jedoch je nach Umweltbedingungen deutlich in ihrer Höhe. Unter teilkontrollierten Bedingungen im Gewächshaus lag der Anteil an Kohlenstoff aus dem gedüngten Stroh im Schnittgut des Rotklees bei 3,71 % des eingearbeiteten Kohlenstoffs im Stroh und im Freiland nur bei 0,45 % (2011) bzw. 0,53 % (2012). Unterbleiben muss hier die Berücksichtigung der strohbürtigen C-Menge in der Wurzel des Rotklees, da die Wurzelmasse im Rahmen der Untersuchungen nicht erfasst und hinsichtlich der ^{13}C -Isotopensignatur analysiert wurde. Die Aufnahme eines nur geringen Teils des düngerbürtigen Kohlenstoffs durch den Rotklee deutet trotz der Anbringung einer Windschutzfolie um die Parzellen und der Umhausung der Gefäße mit transparenter PE-Folie vor allem auf einen raschen Abtransport des CO_2 aus Bodenatmung aus dem Bereich der Pflanzen im Freiland aufgrund von Luftaustauschvorgängen und damit auf eine im Vergleich zu den Bedingungen im Gewächshaus auf eine geringe Verweildauer des Boden- CO_2 im Pflanzenbestand hin. HUBER (1952b) wies mit Messungen in und über einem geschlossenen Weizenbestand einen starken vertikalen Luftaustausch insbesondere tagsüber - verbunden mit der raschen Abnahme des in der Nacht angereicherten bodennahen CO_2 aus der Bodenatmung - nach. RÜSCH (1955) zeigte in Untersuchungen den Einfluss des windabhängigen Luftaustausches auf die bodennahe CO_2 -Konzentration in einem Luzernebestand auf. Demzufolge lag der atmosphärische CO_2 -Gehalt mit Windschutz in Bodennähe aufgrund der CO_2 -

Assimilation der Pflanzen tagsüber nur um etwa 10 ppm unter dem Wert ohne Windschutz. Das bedeutet, dass ein intensiver Austausch zwischen der Luft in und über einem Pflanzenbestand unabhängig vom Einfluss des Windes besteht. Auch MÜLLER-STOLL & GRABERT (1970) verweisen auf die geringe Bedeutung eines Windschutzes hinsichtlich der CO₂-Anreicherung in Bodennähe aus nächtlicher Bodenatmung aufgrund von vertikalen Luftbewegungen unabhängig von der Dichte des Bestandes der angebauten Kultur.

Neben dem Einfluss des vertikalen und horizontalen Luftaustausches im Freiland könnte auch die Aufnahme von Kohlenstoff außerhalb der CO₂-Assimilation durch Blatt und Stängel des Rotklees eine Fehlergröße bei der Schätzung der Aufnahme des ¹³C-markierten strohbürtigen Kohlenstoffs darstellen. Bei einer ähnlichen - wie in der vorliegenden Arbeit beschriebenen - Versuchsanordnung von CHENG & COLEMAN (1990) wurden 500 mg ¹⁴C-markiertes Roggenstroh in den Boden eines Gefäßes eingebracht und mit jeweils einer Roggenpflanze im Freiland aufgestellt. Nach 49 Tagen wurde in den Pflanzen ein Anteil von 0,02 % des gedüngten Kohlenstoffs festgestellt. Da die Gefäßoberfläche mit Folie abgedichtet war, kann davon ausgegangen werden, dass der nachgewiesene ¹⁴C-Kohlenstoff in den Roggenpflanzen nicht durch die Blätter assimiliert, sondern über die Wurzel aufgenommen wurde. Möglich ist nach STOLWIJK & THIMANN 1957 und RAVEN et al. 1988 die Aufnahme von Kohlenstoff durch die Wurzel in Form von CO₂ oder Bicarbonat (HCO₃⁻), wenn auch in geringem Umfang im Vergleich zur insgesamt von der Pflanze assimilierten Menge an CO₂, welchen KICK et al. (1965) auf < 1 % der gesamten CO₂-Aufnahme der Pflanzen schätzen. Einen größeren Einfluss auf die Schätzgenauigkeit hat wahrscheinlich die Aufnahme niedermolekularer organischer Kohlenstoff-Verbindungen, welche u.a. in Form von Phenolen bzw. Phenolderivaten als mikrobielle Ab- und Umbauprodukte von Huminstoffen und Lignin entstehen (WINTER et al. 1959, HAIDER & DOMSCH 1969, FLAIG 1970, KÖGEL-KNABNER 2002, v. LÜTZOW et al. 2006, SMITH et al. 2010, KLOTZBÜCHER et al. 2011) und deren Bedeutung nicht nur in der direkten Aufnahme durch die Pflanzen zu sehen ist, sondern z.B. auch als allelopathisch wirksame Substanzen (EVERALL & LEES 1997, OLOFSDOTTER et al. 2002). FÜHR (1969) ermittelte 27 Tage nach Zugabe von ¹⁴C-markiertem Lignin-Kohlenstoff (50 mg Lignin in 1 l Boden und abgedichteter Gefäßoberfläche) in den Boden einen Anteil von 0,3 bis 1,2 % der gedüngten Menge in Spross und Wurzel von Sonnenblumen, wobei jedoch nur 10 % des von der Pflanze

aufgenommenen Lignin-Kohlenstoffs im Spross nachgewiesen wurden. Einen Anteil zwischen 12 und 17 % der gedüngten Menge verschiedener ^{14}C -markierter Phenolsäuren, welche einer Nährlösung zugegeben wurden, ermittelten HARMS et al. (1969a, 1969b) in Wurzel und Spross von Weizenkeimlingen nach einer Inkubationszeit von sechs Tagen. In Abhängigkeit von der Art der Säure lag der Anteil an ^{14}C -Kohlenstoff im Spross zwischen 10 und 25 % und in der Wurzel zwischen 27 und 52 % der aufgenommenen ^{14}C -Menge. Eine nur in sehr geringem Umfang stattfindende und von der Molekülgröße abhängige Translokation aufgenommener organischer Moleküle von der Wurzel in den Spross stellten FÜHR & SAUERBECK (1967a) in Untersuchungen an Sonnenblume (*Helianthus annuus* L.), Radieschen (*Raphanus sativus* L.) und Möhren (*Daucus carota* L.) fest. Demnach wurden in Abhängigkeit von der Inkubationszeit zwischen 7 und 37 % der mittels Nährlösung zugeführten ^{14}C -markierten Fulvosäuren und Huminsäuren in der Wurzelmasse nachgewiesen und weniger als 1 % im Spross. In ähnlichen Untersuchungen wiesen FÜHR & SAUERBECK (1967b) nur einen Anteil von 0,2 bis 0,4 % des aufgenommenen ^{14}C -markierten Kohlenstoffs im Spross von Sonnenblumen nach. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich für die eigenen Ergebnisse schließen, dass die Aufnahme des gedüngten ^{13}C -markierten Kohlenstoffs außerhalb der CO_2 -Assimilation durch Blatt und Stängel des Rotklees eine Unterschätzung der über das Schnittgut aufgenommenen C-Menge aus dem gedüngten Stroh darstellt und durch die Einbeziehung der Wurzelmasse in die Untersuchungen an Bedeutung gewinnt. Eine räumlich getrennte Erfassung der Aufnahme organischer C-Verbindungen und der Assimilation von ^{13}C -markiertem Kohlenstoff - z.B. angelehnt an die Versuchsanordnung von FÜHR & SAUERBECK (1967a) - würde eine Unterschätzung bei der Ermittlung der CO_2 -Aufnahme aus dem gedüngten Stroh mindern, den technischen Aufwand für Untersuchungen im Freiland jedoch deutlich erhöhen.

4.4 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass nach der Ausbringung von Grüngutkompost und Pferdemist kurzfristig Effekte hinsichtlich einer gesteigerten Bildung an Spross-TM von Rotklee zu verzeichnen waren, welche hauptsächlich auf eine Nährstoffwirkung aus den genannten Düngemitteln zurückzuführen sind. Am deutlichsten wurde eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit sowohl bei Kalium, einem

Nährstoff, welcher überwiegend in anorganischer Form vorliegt, aber auch bei Schwefel und Molybdän nach der Düngung von Grüngutkompost und in etwas geringerem Umfang nach Düngung von Pferdemist. Mit den genannten Düngemitteln wurden jedoch auch vergleichsweise hohe Nährstoffmengen ausgebracht, während mit Stroh und Gehölzhäcksel mittlere bis geringe Mengen an Nährstoffen ausgebracht wurden. Der Vergleich mit der mineralischen P-, K- und S-Düngung zeigte hinsichtlich der Molybdänaufnahme der untersuchten Leguminosen den Vorteil eines für das Pflanzenwachstum günstigen Nährstoffverhältnisses in den organischen Düngemitteln.

Mit dem Grüngutkompost wurden erhebliche Mengen an Stickstoff ausgebracht, welcher von den untersuchten Leguminosen jedoch nur zu einem sehr geringen Teil ausgenutzt wurde (0,3 bis 3,4 % scheinbare N-Ausnutzung). So konnte bei Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee nur ein geringfügig verminderter Anteil an symbiotisch gebundenem Luftstickstoff (N_{dfa}) im Spross im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle festgestellt werden, was den Vorteil dieses Düngemittels besonders vor dem Hintergrund der raschen Freisetzung leicht löslicher Nährstoffe (siehe oben) aufzeigt. Demgegenüber wurde nach der Düngung von frischem Pferdemist ein deutlich verminderter Anteil an symbiotisch gebundenem Luftstickstoff im Spross vor allem bei Saatplatterbse und bei Rotklee ermittelt, was auf eine verstärkte N-Mineralisierung aus dem Pferdemist und einer damit verbundenen höheren scheinbaren N-Ausnutzung zurückzuführen ist. Gleichzeitig war jedoch die absolute Menge an fixiertem Stickstoff nach Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist nicht vermindert und auch der nachfolgende Winterweizen zeigte in einem Versuchsjahr positive Effekte hinsichtlich höherer Kornträge und höherer Rohprotein-Gehalte im Korn infolge der Düngung von Grüngutkompost und Pferdemist zur Vorfrucht. Besonders wegen der besser kalkulierbaren N-Freisetzung erst zur nachfolgenden Kultur kann die Ausbringung dieser beiden Düngemittel zu Leguminosen pflanzenbaulich als günstig bewertet werden.

Mit den organischen Düngemitteln wurde Kohlenstoff in Höhe von $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$ ausgebracht, was besonders bei Material mit einem weiten C/N-Verhältnis wie Stroh und Gehölzhäcksel verstärkt zu einer erhöhten mikrobiellen Einbindung von mineralischem Stickstoff im Boden führt, welcher dann temporär nicht für die Pflanzen verfügbar ist. Dieser Effekt konnte nach der Düngung von Gehölzhäcksel

anhand der N_{\min} -Mengen im Boden nachgewiesen werden und es zeigte sich im Mittel von zwei Jahren vor allem bei Spitzwegerich (Referenzkultur zu Ackerbohne) und Welschem Weidelgras (Referenzkultur zu Rotklee) ein geringerer N-Entzug verbunden mit einer geringeren Spross-TM im Vergleich zur Kontrolle. Eine Reaktion der untersuchten Leguminosen auf die Düngung von Gehölzhäcksel konnte weder hinsichtlich eines erhöhten Anteils an Stickstoff aus der Symbiose im Spross der Leguminosen noch einer verminderten Spross-TM festgestellt werden. Daraus folgt, dass die zeitlich und räumlich sehr begrenzte N-Immobilisierung infolge der Düngung von Gehölzhäcksel offenbar nicht als pflanzenbauliches Instrument zur gezielten N-Verknappung im Boden dienen kann. Günstiger erscheint es, einen größtmöglichen N-Entzug aus dem Boden mit dem Anbau von Zwischenfrüchten vor Leguminosen zu realisieren (JUNG & RAUBER 2010) oder durch den Anbau von Gemengen mit nichtlegumen Gemengepartnern die Konkurrenz um mineralisierten Stickstoff im Boden zu fördern (DANSO et al. 1987).

Die in den Untersuchungen nachgewiesene teils signifikant erhöhte Bodenatmung vor allem nach Einarbeitung von Stroh, Pferdemist und Grüngutkompost im Verlauf der Vegetationszeit lässt auf eine hohe biologische Aktivität in diesen Düngevarianten schließen. Daraus folgt, dass den Pflanzen gegenüber der Kontrolle ein höheres Angebot an bodenbürtigem CO_2 zur Assimilation zur Verfügung stand. Nach eigener Schätzung der düngerbürtigen C-Aufnahme mit der in der Arbeit vorgestellten Methode wurden zwischen 0,5 % (Freiland) und 3,7 % (Gewächshaus) des gedüngten Stroh-Kohlenstoffs vom Rotklee assimiliert. Im Hinblick auf die in der landwirtschaftlichen Praxis auf der Fläche verbleibenden Strohreste und ausgebrachten Düngermengen und der daraus resultierenden aufnehmbaren Mengen an Kohlenstoff wurde in der Vergangenheit ein CO_2 -Düngeeffekt bzw. der Umfang einer direkten C-Rezyklierung aus einer erhöhten Bodenatmung - nicht zuletzt wegen einer fehlenden Methodik zum direkten Nachweis des Verbleibs des düngerbürtigen Kohlenstoffs - zumeist als gering eingeschätzt (LEMMERMANN & ECKL 1924, BAEUMER 1992). Jedoch belegen die ermittelten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit quantitativ den direkten Beitrag des strohbürtigen Kohlenstoffs auf den Anstieg der Schnittgut-TM des Rotklees gegenüber der Kontrolle, welcher - methodisch bedingt - möglicherweise noch unterschätzt wurde. Dies gibt Anlass, den Wirkungen der organischen Düngung hinsichtlich einer direkten C-Rezyklierung vertieft

nachzugehen und die in dieser Arbeit vernachlässigten Nebeneffekte, wie z.B. einen Primingeffekt methodisch einzubeziehen.

Insgesamt kann Grüngutkompost wegen der beschriebenen Wirkungen und darüber hinaus aufgrund seiner physischen Eigenschaften (feinkrümelig, homogen, gut transportier- und ausbringbar) als sehr geeignetes, betriebsfremdes, organisches Düngemittel eingeschätzt werden. Im Hinblick auf die verfügbaren Mengen und der daraus resultierenden Substitutionsmöglichkeit von Nährstoffen scheint der Einsatz von Grüngutkompost eine gute pflanzenbauliche Option der Düngung zu Leguminosen darzustellen, wie die hier ermittelten Ergebnisse belegen. Das jährliche Aufkommen an Bio- und Grünabfall, was sowohl Bioabfälle aus Haushalten als auch Gartenabfälle und Grünschnitt umfasst, liegt in Deutschland zwischen 8 und 9 Mio. t (COESTER & KASTEN 1999, KERN et al. 2003, KERN & RAUSSEN 2009, KEHRES 2011). KEHRES (2011) schätzt das Substitutionspotenzial aus den daraus in Deutschland entstehenden Komposten auf etwa 10 % der in der Landwirtschaft eingesetzten Phosphatmengen und 9 % der eingesetzten Kaliummengen. Auch Gehölzhäcksel - als Ausgangsmaterial des Grüngutkompostes - stellen ebenfalls zu Leguminosen ein geeignetes Düngemittel dar. Wegen des weiten C/N-Verhältnisses und einer zu erwartenden N-Immobilisierung im Boden ist eine Ausbringung ohne negative Effekte auf das Wachstum der Leguminosen möglich. Im Vordergrund standen bisher bei der Anwendung dieser organischen Düngemittel vor allem langfristige Wirkungen im Boden, weniger kurzfristige Düngeeffekte. Mit einem Aufkommen in Deutschland von etwa 4,5 Mio. t an größtenteils verholztem Material aus der Landschaftspflege wird die derzeitige und zukünftige Verwendung des Häckselgutes jedoch weniger als Düngemittel in Landwirtschaft und Gartenbau gesehen, sondern vorrangig in einer thermischen Verwertung zur Energiegewinnung (THUMM et al. 2008, KRANERT et al. 2009, KEHRES 2011). In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass dieses organische Material - zumindest beim Einsatz zu Leguminosen - ein wertvolles Düngemittel im ökologischen, wie auch sicher im konventionellen Landbau darstellt, mit welchem Nährstoffe in größeren Mengen der pflanzlichen Erzeugung zugeführt werden. Zu prüfen ist daher, ob einer land- und gartenbaulichen Verwendung von Gehölzhäcksel nicht der Vorrang vor einer thermischen Verwertung eingeräumt werden muss.

Der Einsatz von Pferdemist kann nach den Ergebnissen aus dieser Arbeit vor allem zu Futterleguminosen vorteilhaft sein, da eine flache Einarbeitung des Mistes

aufgrund des hohen Wasserbedarfes großsamiger Körnerleguminosen zu einem geringen Feldaufgang führen kann. Zudem kann eine verstärkte N-Mineralisierung infolge der Düngung - insbesondere bei den vergleichsweise konkurrenzschwachen einheimischen Körnerleguminosen - zur Förderung des Wachstums nichtlegumer Unkräuter beitragen. Das Aufkommen von Pferdemist ist, wie auch bei Grüngutkompost und Gehölzhäcksel, in Deutschland nicht unerheblich. Der Pferdebestand wird in Deutschland derzeit auf etwa 1 Mio. Tiere geschätzt (SADAU 2012). Das entspricht bei einer Menge von etwa 23 kg Dung und zwischen 3 und 7 kg Einstreu je Tag (WHEELER & SMITH 2002) einem jährlichen Aufkommen zwischen 9,5 und 11 Mio. t Pferdemist. LUNDGREN & PETTERSSON (2009) geben für Europa einen Tierbestand von etwa 5 Mio. Pferden, verbunden mit einem entsprechenden Anfall an Pferdemist, an. Die geschätzten Mengen an verfügbarem Material lassen erkennen, dass sich sowohl für Kompost, als auch für Pferdemist und Gehölzhäcksel für eine Reihe von Betrieben in Abhängigkeit von der regionalen Dichte an Pferdehaltern bzw. der Entfernung zu Kompostieranlagen und kommunalen oder gewerblichen Grüngutsammelanlagen Möglichkeiten bieten, das jeweilige Material in entsprechender Menge zu erhalten.

Die vorliegende Arbeit sollte prüfen, ob es sich bei den untersuchten Düngemitteln um wertvolle Sekundärrohstoffe handelt. Es konnte anhand der Untersuchungen gezeigt werden, dass Grüngutkompost und Gehölzhäcksel zu allen geprüften Leguminosen, Stroh und Pferdemist insbesondere zu Rotklee pflanzenbaulich gut eingesetzt werden können.

5 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die organischen Düngemittel Grüngutkompost, frischer Pferdemist, Gehölzhäcksel und Stroh hinsichtlich ihrer pflanzenbaulichen Eignung für die Ausbringung zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee zu prüfen. Im Mittelpunkt standen dabei kurzfristige Effekte hinsichtlich der Nährstoffaufnahme und Ertragsbildung der Leguminosen, der temporären Verminderung des Angebotes an mineralischem Stickstoff im Boden aufgrund hoher Mengen an organischem Kohlenstoff bei einem weiten C/N-Verhältnis der organischen Düngemittel und die Quantifizierung der Assimilation von strohbürtigem Kohlenstoff durch Rotklee im Verlauf einer Vegetationsperiode. Zudem sollte die Vorfruchtwirkung der Leguminosen auf einen nachfolgenden Winterweizen in Abhängigkeit der Düngung der Leguminosen hinsichtlich des Kornertrages und der Stickstoffaufnahme des Weizens untersucht werden.

In den Jahren 2008 und 2009 wurden am Standort Dresden-Pillnitz im Rahmen eines faktoriellen Feldversuches die organischen Düngemittel Grüngutkompost und Pferdemist mit einem C-Äquivalent von 10 t ha^{-1} und Stroh mit einem C-Äquivalent von 5 t ha^{-1} vor der Saat von Saatplatterbse ausgebracht. Als weitere Prüfglieder wurde eine Düngung mit kohlensaurem Kalk in Höhe von $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ CaCO}_3$ und eine mineralische Düngung mit Kaliumsulfat ($230 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}$ und $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$) und weicherdigem Rohphosphat ($78 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$) durchgeführt. In den Jahren 2009 und 2010 wurden vor der Saat von Ackerbohne und Rotklee analog zur Vorgehensweise bei Saatplatterbse die organischen Düngemittel Grüngutkompost und Pferdemist, kohlensaurer Kalk und Kaliumsulfat/Rohphosphat ausgebracht. Anstelle von Stroh wurde Gehölzhäcksel mit einem C-Äquivalent von 10 t ha^{-1} gedüngt.

In einem Gefäßversuch unter teilkontrollierten Bedingungen im Gewächshaus wurde im Jahr 2011 ^{15}N - und ^{13}C -markiertes Stroh zu Rotklee gedüngt. Anhand der ^{15}N - und ^{13}C -Isotopensignatur wurden die strohbürtigen Stickstoff- und Kohlenstoffanteile im Rotklee und die aufgenommene N- und C-Menge aus dem gedüngten Stroh ermittelt. In den Jahren 2011 und 2012 wurden die Untersuchungen im Rahmen von Gefäßversuchen im Feld durchgeführt. Im Freiland wurde der ^{13}C -Anreicherungsgrad des Strohs gegenüber den Untersuchungen im Gewächshaus deutlich erhöht. Das verwendete Stroh war hier nicht ^{15}N -markiert.

5.1 Ertrag, Nährstoffaufnahme und symbiotische N₂-Fixierung der untersuchten Leguminosen

Der Ertrag an Spross-TM wurde bei der Saatplatterbse infolge der Düngung nicht beeinflusst. Es wurden jedoch ein erhöhter Gehalt an Kalium und Molybdän nach der Düngung von Grüngutkompost und ein erhöhter Gehalt an Schwefel nach der Düngung von Pferdemist in der Spross-TM der Saatplatterbse gegenüber der Kontrolle festgestellt. In einem Vegetationszeitraum von 96 bzw. 98 Tagen wurden die mit den organischen Düngemitteln ausgebrachten Mengen an Kalium scheinbar im Bereich zwischen 3,5 und 9,1 % durch den K-Entzug der Saatplatterbse ausgenutzt. Die mit den organischen Düngemitteln ausgebrachten Mengen an Schwefel wurden scheinbar im Bereich zwischen 1,4 und 5,2 % ausgenutzt. Bei Phosphor konnte anhand der P-Gehalte in der Spross-TM der Saatplatterbse keine erhöhte P-Verfügbarkeit infolge der Düngung festgestellt werden. Auch die scheinbare P-Ausnutzung in Höhe von 0,7 bis 3,1 % der mit den organischen Düngemitteln gedüngten P-Mengen war vergleichsweise niedrig, was auf eine geringe Verfügbarkeit des Phosphors aus den organischen Düngemitteln zurückgeführt werden konnte.

Eine ähnliche Wirkung der organischen Düngung hinsichtlich der Nährstoffaufnahme wie bei der Saatplatterbse zeigte sich auch bei Ackerbohne und Rotklee. Insbesondere nach der Düngung von Grüngutkompost, in Abhängigkeit vom Jahr auch nach der Düngung von Pferdemist konnten erhöhte K-Gehalte und teilweise erhöhte S- und Mo-Gehalte in der Blatt-TM der Ackerbohne bzw. in der Spross-TM des Rotklees festgestellt werden, während hinsichtlich des Phosphors keine Effekte der Düngung erkennbar wurden. Insgesamt wurden die gedüngten Nährstoffmengen durch den Rotklee aufgrund der längeren Vegetationszeit (196 und 200 Tage) gegenüber der Saatplatterbse in einem deutlich größeren Umfang ausgenutzt. Im Jahr 2009 wurde eine erhöhte Spross-TM (+ 17 %) des Rotklees nach der Düngung von Grüngutkompost und im Jahr 2010 nach der Düngung von Pferdemist (+ 14 %) gegenüber der Kontrolle festgestellt, was u.a. auf eine verbesserte Nährstoffverfügbarkeit aus den organischen Düngemitteln zurückgeführt wurde. Die Düngung von Stroh zu Saatplatterbse und Gehölzhäcksel zu Ackerbohne und Rotklee erbrachte keine erkennbar erhöhte Nährstoffverfügbarkeit.

Nach der Düngung von Kaliumsulfat wurden im Blatt der Ackerbohne und im Schnittgut des Rotklees signifikant geringere Molybdän-Gehalte festgestellt, was mit

einem Aufnahmeantagonismus der beiden Nährstoffe begründet wurde. Demgegenüber wurden nach der Düngung von Grüngutkompost bei allen untersuchten Leguminosen die höchsten Mo-Gehalte in der Trockenmasse nach Düngung von Grüngutkompost ermittelt, was zum einen eine gute Verfügbarkeit von Molybdän aus dem Kompost und zudem auf ein günstiges Nährstoffverhältnis hindeutet.

Mit den eingesetzten Partien Grüngutkompost wurden erhebliche Mengen an Gesamt-Stickstoff im Bereich zwischen 277 und 618 kg ha⁻¹ zu den Leguminosen ausgebracht. Mit Pferdemist wurde eine Menge an Gesamt-Stickstoff in Höhe von 256 bis 345 kg ha⁻¹ ausgebracht. Die scheinbare Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs durch die Leguminosen lag jedoch in Abhängigkeit von der Düngung nur im Bereich zwischen 0 und 9 %. Damit konnte gezeigt werden, dass der in den geprüften organischen Düngemitteln enthaltene Stickstoff zum Großteil organisch gebunden vorlag und nur langsam mineralisiert wurde. Der Einfluss auf einen erhöhten Anteil an Stickstoff aus dem Boden im Spross der Leguminosen infolge der organischen Düngung blieb gering. Nur nach Düngung von Pferdemist verringerte sich bei Saatplatterbse der Anteil an symbiotisch fixiertem Luftstickstoff (N_{dfa}) im Spross auf 75 % gegenüber der Kontrolle mit 79 % und bei Rotklee auf 67 % gegenüber der Kontrolle mit 78 %. Bei Ackerbohne zeigte sich kein derartiger Effekt. Der nachfolgende Winterweizen reagierte in einem Jahr mit einem erhöhten Rohproteingehalt im Korn des Weizens auf die Düngung von Pferdemist zu Saatplatterbse und mit einem signifikant höheren Kornertrag des Weizens auf die Düngung von Grüngutkompost zu Ackerbohne. Daher kann in diesen Fällen von einer Erhöhung des Vorfruchtwertes der genannten Leguminosen durch die organische Düngung ausgegangen werden. Der zu den Leguminosen mit dem Pferdemist gedüngte Stickstoff wurde durch den Winterweizen scheinbar zu 2,9 bis 17 % vergleichsweise gut ausgenutzt. Nach Düngung von Grüngutkompost, Stroh und Gehölzhäcksel lag die scheinbare N-Ausnutzung durch den Winterweizen zwischen 0 und 3,6 %.

Aufgrund der hohen Menge an ausgebrachtem Kohlenstoff und eines weiten C/N-Verhältnisses zwischen 45 und 46 im Gehölzhäcksel wurde im Boden in einer Tiefe von 0 bis 30 cm unter Ackerbohne und unter Rotklee ca. 40 Tage nach Düngung und Einarbeitung des Düngemittels ein signifikant verminderter N_{min} -Vorrat gegenüber den Vergleichsvarianten und der Kontrolle ermittelt. Ein Einfluss auf den Anteil an

symbiotisch fixiertem Luftstickstoff am Spross-N von Ackerbohne und Rotklee dieser temporären N-Festlegung im Boden, welche bereits zum Ende der Vegetationsperiode nicht mehr erkennbar war, konnte jedoch nicht festgestellt werden.

5.2 Ermittlung der Kohlenstoffassimilation aus organischen Düngemitteln

Anhand der natürlichen Verteilung von ^{13}C und ^{12}C -Isotopen im Kohlenstoff von organischem Material und aufgrund einer Diskriminierung dieser Isotope bei chemischen und biologischen Vorgängen sollte der Anteil des düngerbürtigen Kohlenstoffs am Spross-C der untersuchten Leguminosen ermittelt werden. Sowohl bei Saatplatterbse, als auch bei Ackerbohne und Rotklee waren die Unterschiede der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte - aufgrund einer sehr geringen Abreicherung an ^{13}C gegenüber dem jeweiligen Düngemittel - in der Spross-TM jedoch so gering, dass ein düngerbürtiger Anteil an Kohlenstoff im Spross der Leguminosen nicht bzw. nur mit unzureichender Schätzgenauigkeit ermittelt werden konnte.

Aufgrund dessen wurde in der Folge mit ^{15}N - und ^{13}C -angereichertem bzw. markiertem Stroh gearbeitet.

Nach Düngung von ^{15}N -markiertem (3,01266 atom%) Stroh im Gewächshaus wurde in der Schnittgut-TM des Rotklees zu jedem Schnitttermin ein zunehmender ^{15}N -Anteil am Schnittgut-N ermittelt. Auf diese Weise konnte eine biologische Umsetzung des gedüngten Strohs nachgewiesen werden. Anhand der zusätzlichen ^{13}C -Markierung des Strohs in Höhe von 1,14325 atom% wurde ein Anteil von 3,7 % ermittelt, welcher mit sechs Aufwüchsen aus dem gedüngten Stroh-C durch den Rotklee aufgenommen wurde. Der Anteil des strohbürtigen Kohlenstoffs am Schnittgut-C des Rotklees betrug 3,0 %.

Für die Untersuchungen im Freiland wurde Stroh mit einem Anreicherungsgrad an ^{13}C in Höhe von 9,7 atom% verwendet. Mit vier Aufwüchsen konnte kumulativ eine Aufnahme von strohbürtigem Kohlenstoff in der Schnittgut-TM des Rotklees in Höhe von 0,5 % nachgewiesen werden. Der Anteil des strohbürtigen Kohlenstoffs am Schnittgut-C des Rotklees betrug im Freiland 0,2 %.

Mit der angewandten Methode wurde damit erstmals der Umfang der düngerbürtigen Kohlenstoff-Aufnahme unter Freilandbedingungen und die direkte Kohlenstoffzyklisierung aus organischer Düngung quantifiziert.

6 Literaturverzeichnis

- AGUILAR, A. & VAN DIEST, A., 1981: Rock-phosphate mobilization induced by the alkaline uptake pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant and Soil*, 61 (1-2), 27-42.
- AINSWORTH, E. A. & LONG, S. P., 2005: What have we learned from 15 years of free air CO₂ enrichment (FACE)? A metaanalytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165 (2), 351-372.
- AIRAKSINEN, S., HEINONEN-TANSKI, H., HEISKANEN, M. L., 2001: Quality of different bedding materials and their influence on the compostability of horse manure. *Journal of Equine Veterinary Science*, 21 (3), 125-130.
- AJWA, H. A. & TABATABAI, M. A., 1994: Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 18 (3), 175-182.
- ALBERT, E., 2001: Wirkung einer langjährig differenzierten mineralisch-organischen Düngung auf Ertragsleistung, Humusgehalt, Netto-Mineralisierung und N-Bilanz. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 46 (3-4), 187-213.
- AMBERGER, A., GUTSER, R., TEICHER, K., 1974: Kaliumernährung der Pflanzen und Kaliumdynamik auf kalium-fixierendem Boden. *Plant and Soil*, 40 (2), 269-284.
- AMLINGER, F., GÖTZ, B., DREHER, P., GESZTI, J., WEISSTEINER, C., 2003: Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilisation and availability - a review. *European Journal of Soil Biology*, 39 (3), 107-116.
- ASCHE, E. & STEFFENS, D., 1995: Einfluss verschiedener N-Fraktionen auf die N-Nachlieferung von Bioabfallkomposten. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 76, 725-728.
- ASDALL, Å. & BAKKEN, A., 1999: Nutrient balances and yields during conservation to organic farming in two crop rotation systems. In: OLESEN, J. E., ELTUN, R., GOODING, M. J., E. S. JENSEN, KÖPKE, U. (Hrsg.): *Designing and Testing Crop Rotations for Organic Farming - Proceedings from an International workshop*. 125-132, Tjele (Dänemark).
- ASMUS, F., 1995: Ergebnisse aus einem langjährigen Dauerfeldversuch zur organisch-mineralischen Düngung auf Tieflehm-Fahlerde. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 39 (5), 359-367.

- ATKINSON, H. J., GILES, G. R., DESJARDINS, J. G., 1958: Effect of farmyard manure on the trace element content of soils and of plants grown thereon. *Plant and Soil*, 10 (1), 32-36.
- AUERSWALD, K., STANJEK, H., BECHER, H. H., 1992: Böden in Landschaftsausschnitten Bayerns. 4. Bodenabfolge in Dogger-Lias-Sedimenten am Hesselberg. *Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch* 69, S. 73-87.
- AZAM, F., ASHRAF, M., LODHI, A., SAJJAD, M. I., 1990: Availability of soil and fertilizer nitrogen to wheat (*Triticum aestivum* L.) following rice-straw amendment. *Biology and Fertility of Soils*, 10(2), 134-138.
- AZEEZ, J. O. & VAN AVERBEKE, W., 2010: Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil. *Bioresource Technology*, 101(14), 5645-5651.
- BAHRENBERG, G., HELBRECHT, I., SCHRAMKE, W., TAUBMANN, W., TIPPKÖTTER, R., VENZKE, J-F., ZOLITSCHKA, B., (Hrsg.), 2003: Studien zur standortgerechten Kompostanwendung auf drei pedologisch unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Flächen der Wildeshauser Gest, Niedersachsen. *Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung*, Heft 39, Universität Bremen.
- BAEUMER, K., 1986: Umweltbewusster Landbau: Zurück zu den Ideen des 19. Jahrhunderts? In: *Berichte über Landwirtschaft* 64 (1), 153-169, Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin.
- BAEUMER, K., 1992: *Allgemeiner Pflanzenbau*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 3. Auflage.
- BALESDENT, J., MARIOTTI, A., GUILLET, B., 1987: Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 19 (1), 25-30.
- BARBER, S., A., WALKER, J. M., VASEY, E., H., 1963: Mechanisms for movement of plant nutrients from soil and fertilizer to plant root. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 11 (3), 204-207.
- BARBER, S., A., 1995: *Soil nutrient bioavailability – a mechanistic approach*. 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
- BARKER, A. V. & PILBEAM, D. J., (Hrsg.) 2007: *Handbook of plant nutrition*. Boca Raton [u. A.]: CRC Press, Taylor & Francis. S. 51-91.
- BARSHAD, I., 1951: Factors affecting the molybdenum content of pasture plants: II. Effect of soluble phosphates, available nitrogen, and soluble sulfates. *Soil Science*, 71 (5), 387-398.

- BARTL, B., HARTL, W., HORAK, O., 2002: Longterm application of biowaste compost versus mineral fertilization: Effects on the nutrient and heavy metal contents of soil and plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165 (2), 161-165.
- BECANA, M. & SPRENT, J. I., 1987: Nitrogen fixation and nitrate reduction in the root nodules of legumes. *Physiologia Plantarum*, 70 (4), 757-765.
- BECANA, M., APARICIO TEJO, P., SÁNCHEZ-DÍAZ, M., 1988: Nitrate and hydrogen peroxide metabolism in *Medicago sativa* nodules and possible effect on leghaemoglobin function. *Physiologia Plantarum*, 72 (4), 755-761.
- BECANA, M., MINCHIN, F. R., SPRENT, J. I., 1989: Short-term inhibition of legume N₂ fixation by nitrate. *Planta*, 180 (1), 40-45.
- BECKER, K. W., 1984: Düngung, N-Umsatz und Pflanzenwachstum in ihrer Wirkung auf die langfristige Protonenbilanz von Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 147 (4), 476-484.
- BECKER, K., HEILMANN, S., RIFFEL, A., LEITHOLD, G., 2013: Wirkung einer Schwefel- und Gülledüngung auf den Trockensubstanz- und Stickstofftrag eines Futterleguminosenbestandes. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 220-221.
- BECKING, J. H., 1961: A requirement of molybdenum for the symbiotic nitrogen fixation in alder (*Alnus glutinosa* G.) *Plant and Soil*, 15 (3), 217-227.
- BEER, K., KORIATH, H., PODLESAK, W., 1990: Organische und mineralische Düngung. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin.
- BEKELE, T., CINO, B. J., EHLERT, P. A. I., VAN DER MAAS, A. A., VAN DIEST, A., 1983: An evaluation of plant-borne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. *Plant and Soil*, 75 (3), 361-378.
- BENNER, R., FOGEL, M. L., SPRAGUE, E. K., HODSON, R. E., 1987: Depletion of ¹³C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies. *Nature*, 329 (6141), 708-710.
- BERGMANN, W., 1993: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. 3. Auflage, Gustav Fischer Verlag Jena.
- BERNAL, M. P., PAREDES, C., SANCHEZ-MONEDERO, M. A., CEGARRA, J., 1998: Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63 (1), 91-99.
- BESSHO, T. & BELL, L. C., 1992: Soil solid and solution phase changes and mung bean response during amelioration of aluminium toxicity with organic matter. *Plant and Soil*, 140 (2), 183-196.

- BIBAK, A. & BORGGGAARD, O. K., 1994: Molybdenum adsorption by aluminium and iron oxides and humic acid. *Soil Science*, 158 (5), 323-328.
- BIELESKI, R. L. & FERGUSON, I. B., 1983: Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: *Inorganic Plant Nutrition* (422-449). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- BISHOP, R. F., SMELTZER, G. G., MACEachern, C. R., 1976: Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on yields, protein contents and nutrient levels in soybeans, field peas and fababeans. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 7 (4), 387-404.
- BMELV - BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ - (Hrsg.), 2012: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2012. Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup.
- BOHLOOL, B. B., LADHA, J. K., GARRITY, D. P., GEORGE, T., 1992: Biological nitrogen fixation for sustainable agriculture: A perspective. *Plant and Soil* 141, 1-11.
- BÖHM, H., 2013: Auswirkungen einer Schwefeldüngung auf den Ertrag und die Nährstoffzusammensetzung eines Klee grasbestandes. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 216-219.
- BOLDRIN, A. & CHRISTENSEN, T. H., 2010: Seasonal generation and composition of garden waste in Aarhus (Denmark). *Waste management*, 30 (4), 551-557.
- BOLLER, B. C. & NÖSBERGER, J., 1994: Differences in nitrogen fixation among field-grown red clover strains at different levels of ¹⁵N-fertilization. *Euphytica*, 78 (3), 67-174.
- BOND, W. & GRUNDY, A. C., 2001: Non chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research*, 41 (5), 383-405.
- BORCHMANN, W. 2002: Mikronährstoff-Forschung an den agrarwissenschaftlichen Instituten in Rostock - ein Rückblick. (www.Date.hu/kiadvany/acta/2002-08i/borchmann.pdf), eingesehen im Oktober 2014.
- BORTELS, H., 1930: Molybdän als Katalysator bei der biologischen Stickstoffbindung. *Archiv für Mikrobiologie*, 1 (1), 333-342.
- BORTELS, H., 1937: Über die Wirkung von Molybdän- und Vanadiumdüngungen auf Leguminosen. *Archiv für Mikrobiologie*, 8 (1-4), 13-26.
- BRADÉ, W., DISTL, O., SIEME, H., ZEYNER, A., (Hrsg.) 2011: Pferde zucht, Haltung und Fütterung, Empfehlungen für die Praxis. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Sonderheft 353.

- BRANDT, M. & WILDHAGEN, H., 1999: Netto-N-Mineralisation nach mehrjähriger ackerbaulicher Verwertung von Bioabfallkompost und Grünguthäcksel. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 91, 743-746.
- BROESHART, H., 1974: Quantitative measurement of fertilizer uptake by crops. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 22 (1974), 245–254.
- BROWN, P. E. & GWINN, A. R., 1917: Effect of sulfur and manure on availability of rock phosphate in soil. *Agricultural Experiment Station, Iowa State, College of Agriculture and Mechanic Arts*, No. 43, 367-389.
- BRUNS, C., GOTTSCHALL, R., ZELLER, W., SCHÜLER, C., VOGTMANN, H., 1993: Survival rates of plant pathogens during composting of biogenic wastes in commercial composting plants under different decomposition conditions. *Soil Biota, Nutrient Cycling and Farming Systems*. Lewis Publishers/CRC-Press. Boca Raton, Florida, 41-51.
- BUKOVAC, M. J. & WITTWER, S. H., 1957: Absorption and Mobility of Foliar Applied Nutrients. *Plant Physiology*, 32 (5), 428.
- CAMPBELL, N. A., REECE, J. B., 2003: *Biologie*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 6. Auflage.
- CAYUELA, M. L., VELTHOF, G. L., MONDINI, C., SINICCO, T., VAN GROENIGEN, J. W., 2010: Nitrous oxide and carbon dioxide emissions during initial decomposition of animal by-products applied as fertilisers to soils. *Geoderma*, 157 (3), 235-242.
- CERLING, T. E., QUADE, J., WANG, Y., BOWMAN, J. R., 1989: Carbon isotopes in soils and paleolols as ecology and palaeoecology indicators. *Nature*, 341 (6238), 138-139.
- CHALHOUB, M., GARNIER, P., COQUET, Y., MARY, B., LAFOLIE, F., HOUOT, S., 2013: Increased nitrogen availability in soil after repeated compost applications: Use of the PASTIS model to separate short and long-term effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 144-157.
- CHANTIGNY, M. H., ROCHETTE, P., ANGERS, D. A., 2001: Short-term C and N dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw: A field experiment. *Canadian Journal of Soil Science*, 81 (2), 131-137.
- CHENG, W., 1996: Measurement of rhizosphere respiration and organic matter decomposition using natural ¹³C. *Plant and Soil*, 183 (2), 263-268.
- CHENG, W. & COLEMAN, D. C., 1990: Effect of living roots on soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 22 (6), 781-787.

- CHENG, W. & JOHNSON, D. W., 1998: Elevated CO₂, rhizosphere processes, and soil organic matter decomposition. *Plant and Soil*, 202 (2), 167-174.
- CHIEN, S. H. & MENON, R. G., 1995: Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fertilizer Research*, 41 (3), 227-234.
- CHRISTENSEN, B. T., 1987: Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19 (4), 429-435.
- CIERESZKO, I., MIŁOSEK, I., RYCHTER, A. M., 1999: Assimilate distribution in bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) during phosphate limitation. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 68 (4), 269-273.
- CLAASSEN, N. & JUNGK, A., 1984: Bedeutung von Kaliumaufnahme, Wurzelwachstum und Wurzelhaaren für das Kaliumaneignungsvermögen verschiedener Pflanzenarten. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 147 (3), 276-289.
- COESTER, M. & KASTEN, J., 1999: Grüngutkompost oder Grünguthäcksel? Vergleichende Betrachtung zwischen den ökologisch und ökonomisch günstigen Verwertungswegen von Grüngutabfällen im ländlichen Raum. *Müll und Abfall*, 31 (1), 22-28.
- COLEMAN, K. & JENKINSON, D. S., 1999: ROTH C-26.3. A model for the turnover of carbon in soils. Herts, Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, UK.
- CONSTANTINIDES, M. & FOWNES, J. H., 1994: Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. *Soil Biology and Biochemistry*, 26 (1), 49-55.
- COURTNEY, R. G. & MULLEN, G. J., 2008: Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. *Bioresource Technology*, 99 (8), 2913-2918.
- CORDELL, D., DRANGERT, J. O., WHITE, S., 2009: The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global environmental change*, 19 (2), 292-305.
- COREY, R. B., 1990: Physical-Chemical Aspects of Nutrient Availability. *Soil Testing and Plant Analysis*, 3rd edition. 11-24.
- CRAIG, H., 1953: The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3 (2), 53-92.
- CRAIG, H., 1957: Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 12 (1), 133-149.

- CRUYWAGEN, J. J. & DE WET, H. F., 1988: Equilibrium study of the adsorption of molybdenum (VI) on activated carbon. *Polyhedron*, 7 (7), 547-556.
- DALENBERG, J. W. & JAGER, G., 1989: Priming effect of some organic additions to ¹⁴C-labelled soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 21 (3), 443-448.
- DANSO, S. K. A., ZAPATA, F., HARDARSON, G., FRIED, M., 1987: Nitrogen fixation in fababeans as affected by plant population density in sole or intercropped systems with barley. *Soil Biology Biochemistry*, Vol. 19 (4), 411-415.
- DAVIES, E. B., 1956: Factors affecting molybdenum availability in soils. *Soil Science*, 81 (3), 209-222.
- DAWSON, C. J. & HILTON, J., 2011: Fertilizer availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy*, 36, 14-22.
- DE BOER, D. L. & DUKE, S. H., 1982: Effects of sulphur nutrition on nitrogen and carbon metabolism in lucerne (*Medicago sativa* L.). *Physiologia Plantarum*, 54 (3), 343-350.
- DE HAAN, S., 1981: Results of municipal waste compost research over more than 50 years at the institute for soil fertility at Haren/Groningen. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 29 (1), 49-61.
- DEMETZ, M. & INSAM, H., 1999: Phosphorus availability in a forest soil determined with a respiratory assay compared to chemical methods. *Geoderma*, 89 (3), 259-271.
- DILLY, O., 2001: Microbial respiratory quotient during basal metabolism and after glucose amendment in soils and litter. *Soil Biology and Biochemistry*, 33 (1), 117-127.
- DING, W., MENG, L., YIN, Y., CAI, Z., ZHENG, X., 2007: CO₂-emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, 39 (2), 669-679.
- DÖHLER, H., 2005: *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. 13. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt.
- DONALD, C. M. & HAMBLIN, J., 1976: The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*, 28, 361-405.
- DRINKWATER, L. E., WAGONER, P., SARRANTONIO, M., 1998: Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 396 (6708), 262-265.

- EDMEADES, D. C., 2003: The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 66 (2), 165-180.
- EG-VERORDNUNG Nr. 889 der Kommission, 2008: Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische / biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen / biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen / biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle, ABl. Nr. L 250 vom 18.09.2008
- EILAND, F., KLAMER, M., LIND, A. M., LETH, M., BAATH, E., 2001: Influence of initial C/N ratio on chemical and microbial composition during long term composting of straw. *Microbial Ecology*, 41 (3), 272-280.
- ELLMER, F., PESCHKE, H., KÖHN, W., CHMIELEWSKI, F. M., BAUMECKER, M., 2000: Tillage and fertilizing effects on sandy soils. Review and selected results of long term experiments at Humboldt University Berlin. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163 (3), 267-272.
- ELSHEIKH, E. A., ELZIDANY, A. A., 1997: Effect of Rhizobium inoculation, organic and chemical fertilizers on proximate composition in vitro protein digestibility, tannin and sulphur content of faba beans. *Food Chemistry*, 59 (1), 41-45.
- ERFKAMP, J. & MÜLLER, A., 1990: Die Stickstoff-Fixierung. Aktuelle chemische und biologische Aspekte. *Chemie in unserer Zeit* 24 (6), 267-279.
- EVERALL, N. C. & LEES, D. R., 1997: The identification and significance of chemicals released from decomposing barley straw during reservoir algal control. *Water Research*, 31 (3), 614-620.
- FARQUHAR, G. D., EHLERINGER, J. R., HUBICK, K. T., 1989: Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 40 (1), 503-537.
- FENGEL, D. & WEGENER, G., 1983: Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter.
- FERNÁNDEZ, F. G. & HOEFT, R. G., 2009: Managing soil pH and crop nutrients. *Illinois agronomy handbook*. 24th ed. Univ. of Illinois, Urbana, 91-112.
- FINN, C. E., LUBY, J. J., ROSEN, C. J., ASCHER, P. D., 1991: Evaluation in vitro of blueberry germplasm for higher pH tolerance. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116 (2), 312-316.
- FISCHER, H., 1920: Pflanzenwuchs und Kohlensäure. *Naturwissenschaften*, 8 (22), 413-417.

- FISCHINGER, S. A., BECKER, K., LEITHOLD, G., 2011: Auswirkungen unterschiedlicher S-Versorgungszustände auf den N-Flächenertrag eines Luzerne-Klee-grasbestandes. Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Gießen, 183-184.
- FISCHINGER, S. A., BECKER, K., RIFFEL, A., LEITHOLD, G., 2013: Effekte einer Schwefel- und Phosphor-Düngung auf Futterleguminosen auf einem Schwefel- und Phosphormangelstandort. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 62-63.
- FLAIG, W., 1970: Über die Stoffwechselaktivität von Humusbestandteilen. *Qualitas Plantarum et Materiae Vegetabiles*, 20 (1-2), 113-136.
- FONTAINE, S., MARIOTTI, A., ABBADIE, L., 2003: The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology & Biochemistry*, 35 (6), 837-843.
- FOX, R. H., MYERS, R. J. K., VALLIS, I., 1990: The nitrogen mineralization rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin, and nitrogen contents. *Plant and Soil*, 129 (2), 251-259.
- FRANCOU, C., LINÈRES, M., DERENNE, S., LE VILLIO-POITRENAUD, M., HOUOT, S., 2008: Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Biorecourse Technology*, 99 (18), 8926-8934.
- FÜHR, F., 1969: Die Aufnahme von Ligninkohlenstoff durch Sonnenblumenwurzeln aus dem Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 122 (1), 43-52.
- FÜHR, F. & SAUERBECK, D., 1967a: The uptake of colloidal organic substances by plant roots as shown by experiments with ¹⁴C-labelled humus compounds. In: *Berichte der Kernforschungsanlage Jülich Nr. 490*, Kernforschungsanlage Jülich, 317-328.
- FÜHR, F. & SAUERBECK, D., 1967b: The uptake of straw decomposition products by plant roots. In *Report FAO/IAEA Meeting, Vienna*, Pergamon Press, Oxford, 317-327.
- GARCIA, C., HERNANDEZ, T., COSTA, F., 1991: Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes. *Environmental Management*, 15 (3), 433-439.
- GARCIA-GOMEZ, A., BERNAL, M. P., ROIG, A., 2002: Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology*, 83 (2), 81-87.

- GARZ, J., STUMPE, H., SCHLIEPHAKE, W., HAGEDORN, E., 1996: Ertragsentwicklung im Dauerversuch Ewiger Roggenbau Halle nach den 1990 vorgenommenen Umstellungen in der Düngung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 159 (4), 373-376.
- GAUDRY, A., ZEROUAL, S., GAIE-LEVREL, F., MOSKURA, M., BOUJRHAL, F. Z., EL MOURSALI, R. C., DELMAS, R., 2007: Heavy metals pollution of the Atlantic marine environment by the Moroccan phosphate industry, as observed through their bioaccumulation in *Ulva lactuca*. Water, Air, and Soil Pollution, 178 (1-4), 267-285.
- GAYLER, K. R. & SYKES, G. E., 1985: Effects of nutritional stress on the storage proteins of soybeans. Plant Physiology, 78 (3), 582-585.
- GENTILE, R., VANLAUWE, B., CHIVENG, P., SIX, J., 2008: Interactive effects from combining fertilizer and organic residue inputs on nitrogen transformations. Soil Biology and Biochemistry, 40 (9), 2375-2384.
- GERKE, J., RÖMER, W., JUNGK, A., 1994: The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus* L.; effects on soil solution concentrations of phosphate, iron, and aluminum in the proteoid rhizosphere in samples of an oxisol and a luvisol. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 157 (4), 289-294.
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STADELMANN, F. X., STICHER, H., 1997: Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2. Auflage.
- GOLDBERG, S. & FORSTER, H. S., 1998: Factors affecting molybdenum adsorption by soils and minerals. Soil Science, 163 (2), 109-114.
- GÖK, M. & OTTOW, J. C. G., 1988: Effect of cellulose and straw incorporation in soil on total denitrification and nitrogen immobilization at initially aerobic and permanent anaerobic conditions. Biology and Fertility of Soils, 5 (4), 317-322.
- GÖTZ, K. P., STAROSKE, N., RADCHUK, R., EMERY, R. N., WUTZKE, K. D., HERZOG, H., WEBER, H., 2007: Uptake and allocation of carbon and nitrogen in *Vicia narbonensis* plants with increased seed sink strength achieved by seed-specific expression of an amino acid permease. Journal of Experimental Botany, 58 (12), 3183-3195.
- GOTTSCHALL, R. & BIDLINGMAIER, W. 2000: Biologische Abfallverwertung: 96 Tabellen. Ulmer Verlag, Stuttgart (Hohenheim).
- GUPTA, U. C., 1971a: Influence of various organic materials on the recovery of molybdenum and copper added to a sandy clay loam soil. Plant and Soil, 34 (1), 249-253.

- GUPTA, U. C., 1971b: Boron and molybdenum nutrition of wheat, barley and oats grown in Prince Edward Island soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 51 (3), 415-422.
- GUPTA, U. C., (Hrsg.), 1997: Molybdenum in agriculture. Cambridge University Press.
- GUPTA, U. C., CHIPMAN, E. W., MACKAY, D. C., 1978: Effects of molybdenum and lime on the yield and molybdenum concentration of crops grown on acid sphagnum peat soil. *Canadian Journal of Plant Science*, 58 (4), 983-992.
- GUPTA, U. C. & MEHLA, D. S., 1980: Influence of sulphur on the yield and concentration of copper, manganese, iron and molybdenum in berseem (*Trifolium alexandrinum*) grown on two different soils. *Plant and Soil*, 56 (2), 229-234.
- GUTSER, R., 1996: Klärschlamm und Kompost als Sekundärrohstoffdünger. VDLUFA-Schriftenreihe, 44, 29-44.
- GUTSER, R. & VILSMEIER, K., 1985: N-Umsatz von verschiedenem Pflanzenmaterial im Boden in Gefäß- und Feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 148 (6), 595-606.
- GUTSER, R. & EBERTSEDER, T., 2002: Grundlagen zur Nährstoff- und Sonderwirkung sowie zu optimalen Einsatzstrategien von Komposten. In: Zentralverband Gartenbau e.V. Bonn (Hrsg): *Kompost im Gartenbau*, 47-72.
- GUTSER, R., EBERTSEDER, T., WEBER, A., SCHRAMML, M., SCHMIDHALTER, U., 2005: Short term and residual availability of nitrogen after long term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168 (4), 439-446.
- HAAS, G. & FRIEDT, W., 1990: Ziele und Möglichkeiten der Züchtung nährstoffeffizienter Nutzpflanzen. Arbeitstagung der "Arbeitsgemeinschaft der Saatzuchtleiter" innerhalb der Vereinigung österr. Pflanzenzüchter, 20.-22.11. 1990, Bundesanstalt für alpenländ. Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, Österreich, 21-37.
- HABTEMICHAEL, K. H., SINGH, B. R., AUNE, J. B., 2007: Wheat response to N₂ fixed by faba bean (*Vicia faba* L.) as affected by sulfur fertilization and rhizobial inoculation in semi-arid Northern Ethiopia. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170 (3), 412-418.
- HADAS, A., KAUTSKY, L., GOEK, M., ERMAN KARA, E., 2004: Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biology and Biochemistry*, 36 (2), 255-266.

- HAHN, V., HOEGBERG, P., BUCHMANN, N., 2006: ^{14}C - a tool for separation of autotrophic and heterotrophic soil respiration. *Global Change Biology*, 12 (6), 972-982.
- HAIDER, K., 1992: Problems related to the humification processes in soils of temperate climates. In: STOTZKY, G. & BOLLAG, J.-M., (Hrsg.): *Soil Biochemistry*, 7, 55-94.
- HAIDER, K. & DOMSCH, K. H., 1969: Abbau und Umsetzung von lignifiziertem Pflanzenmaterial durch mikroskopische Bodenpilze. *Archives of Microbiology*, 64 (4), 338-348.
- HALL, I. V., AALDERS, L. E., TOWNSEND, L. R., 1964: The effects of soil pH on the mineral composition and growth of the lowbush blueberry. *Canadian Journal of Plant Science*, 44 (5), 433-438.
- HAMLIN, R. L., 2007: Molybdenum. In: BARKER, A. V. & PILBEAM D. J. (Hrsg.): *Handbook of plant nutrition*. Taylor & Francis Group, 375-394.
- HANDAYANTO, E. & GILLER, K. E., 1994: Nitrogen release from prunings of legume hedgerow trees in relation to quality of the prunings and incubation method. *Plant and Soil*, 160 (2), 237-248.
- HANEKLAUS, S., BLOEM, E., SCHNUG, E., DE KOK, L., STULEN, I., 2007: Sulfur. In: PARKER, A. & PILBEAM, D., 2007: *Handbook of plant nutrition*. Verlag Taylor & Francis. New York, 183-238.
- HANSEN, A. P., PEOPLES, M. B., GRESSHOFF, P. M., ATKINS, C. A., PATE, J. S., CARROLL, B. J., 1989: Symbiotic Performance of Supernodulating Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) Mutants during Development on Different Nitrogen Regimes. *Journal of Experimental Botany*, 40 (7), 715-724.
- HARDARSON, G., ZAPATA, F., DANSO, S. K. A., 1984: Effect of plant genotype and nitrogen fertilizer on symbiotic nitrogen fixation by soybean cultivars. *Plant and Soil*, 82 (3), 397-405.
- HARDARSON, G., DANSO, S. K. A., ZAPATA, F., REICHARDT, K., 1991: Measurements of nitrogen fixation in fababean at different N fertilizer rates using the ^{15}N isotope dilution and 'A-value' methods. *Plant and Soil*, 131 (2), 161-168.
- HARDARSON, G. & ATKINS, C., 2003: Optimising biological N_2 fixation by legumes in farming systems. *Plant and Soil*, 252 (1), 41-54.
- HARGREAVES, J. C., ADL, M. S., WARMAN, P. R., 2008: A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123 (1), 1-14.

- HARMS, H., SÖCHTIG, H., HAIDER, K., 1969a: Untersuchungen zur Aufnahme und Umwandlung C¹⁴-markierter Phenole durch die Pflanze. *Plant and Soil*, 31 (1), 129-142.
- HARMS, H., SÖCHTIG, H., HAIDER, K., 1969b: Untersuchungen zur Aufnahme und Umwandlung C¹⁴-markierter Phenole durch die Pflanze. *Plant and Soil*, 31 (2), 257-272.
- HARPER, S. H. T. & LYNCH, J. M., 1981: The kinetics of straw decomposition in relation to its potential to produce the phytotoxin acetic acid. *Journal of Soil Science*, 32 (4), 627-638.
- HARTL, W. & ERHART, E., 2005: Crop nitrogen recovery and soil nitrogen dynamics in a 10-year field experiment with biowaste compost. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168 (6), 781-788.
- HARTWIG, U. A., LÜSCHER, A., DAEPP, M., BLUM, H., SOUSSANA, J. F., NÖSBERGER, J., 2000: Due to symbiotic N₂ fixation, five years of elevated atmospheric CO₂ had no effect on the N concentration of plant litter in fertile, mixed grassland. *Plant and Soil*, 224 (1), 43-50.
- HATCHER, P. E. & MELANDER, B., 2003: Combining physical, cultural and biological methods: prospects for integrated non chemical weed management strategies. *Weed Research*, 43 (5), 303-322.
- HASHIMOTO, K. & YAMASAKI, S. I., 1976: Effects of molybdenum application on the yield, nitrogen nutrition and nodule development of soybeans. *Soil Science and Plant Nutrition*, 22 (4), 435-443.
- HASSE, P. & KIRCHMEYER, F., 1927: Die Bedeutung der Bodenatmung für die CO₂ Ernährung der Pflanzen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 10 (5), 257-298.
- HARDIE, K. & LEYTON, L., 1981: The influence of vesicular arbuscular mycorrhiza on growth and water relations of Red Clover. *New Phytologist*, 89 (4), 599-608.
- HAUTER, R. & STEFFENS, D., 1985: Einfluß einer mineralischen und symbiontischen Stickstoffernährung auf Protonenabgabe der Wurzeln, Phosphat-Aufnahme und Wurzelentwicklung von Rotklee. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 148 (6), 633-646.
- HAYNES, R. J. & NAIDU, R., 1998: Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51 (2), 123-137.

- HE, Z., YANG, X., KAHN, B. A., STOFFELLA, P. J., CALVERT, D. V., 2001: Plant nutrition benefits of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and micronutrients from compost utilization. CRC Press LLC, Compost utilization in horticultural cropping systems, 307-317.
- HEERAMAN, D. A. & JUMA, N. G., 1993: A comparison of minirhizotron, core and monolith methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L.) and fababean (*Vicia faba* L.) root distribution. Plant and Soil, 148 (1), 29-41.
- HEMINGWAY, R. G., 1962: Copper, Molybdenum, Manganese and Iron contents of herbage as influenced by fertilizer treatments over a three year period. Grass and Forage Science, 17 (3), 182-187.
- HENRIKSEN, T. M. & BRELAND, T. A., 1999: Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil. Soil Biology and Biochemistry, 31 (8), 1121-1134.
- HILDEBRAND, E. E., 1979: Erfassung und Charakterisierung von Polyphenolen als potentiellen Wuchshemmstoffen in kompostierten Siedlungsabfällen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 29 (2), 609-622.
- HIMMELBLAU, E. & AMASINO, R., 2001: Nutrients mobilized from leaves of *Arabidopsis thaliana* during leaf senescence. Journal of Plant Physiology 158, 1317-1323.
- HINSINGER, P. & GILKES, R. J., 1997: Dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of five plant species grown in an acid, P-fixing mineral substrate. Geoderma, 75 (3), 231-249.
- HOCHMUTH, G., MAYNARD, D., VAVRINA, C., HANLON, E., SIMONNE, E., 2010: Plant tissue analysis and interpretation for vegetable crops in Florida. (www.edis.ifas.ufl.edu/pdf/EP/EP08100.pdf), eingesehen im Oktober 2014.
- HOFFLAND, E., FINDENEGG, G. R., NELEMANS, J. A., 1989: Solubilization of rock phosphate by rape. Plant and Soil, 113 (2), 155-160.
- HOFFLAND, E., 1992: Quantitative evaluation of the role of organic acid exudation in the mobilization of rock phosphate by rape. Plant and Soil, 140 (2), 279-289.
- HØGH-JENSEN, H., 1999: The proportion of green fallow in stockless farming systems: Grain yield, nitrogen leaching and soil organic matter. In: OLESEN, J. E., ELTUN, R., GOODING, M. J., E. S. JENSEN, KÖPKE, U. (Hrsg.): Designing and Testing Crop Rotations for Organic Farming - Proceedings from an International workshop. 223-234, Tjele (Dänemark).

- HUBER, B., 1952a: Der Einfluss der Vegetation auf die Schwankungen des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 4 (2), 154-167.
- HUBER, B., 1952b: Über die vertikale Reichweite vegetationsbedingter Tagesschwankungen im CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 71 (11), 372-380.
- HUNGATE, B. A., DIJKSTRA, P., JOHNSON, D., HINKLE, C. R., DRAKE, B., 1999: Elevated CO₂ increases nitrogen fixation and decreases soil nitrogen mineralization in Florida scrub oak. Global Change Biology, 5 (7), 781-789.
- HUSSAIN, K., ISLAM, M., SIDDIQUE, M. T., HAYAT, R., MOHSAN, S., 2011: Soybean growth and nitrogen fixation as affected by sulfur fertilization and inoculation under rainfed conditions in Pakistan. International Journal of Agriculture and Biology, 13 (6), 951-955.
- INGESTAD, T., 1982: Relative addition rate and external concentration; driving variables used in plant nutrition research. Plant, Cell & Environment, 5 (6), 443-453.
- ISRAEL, D. W. & JACKSON, W. A., 1982: Ion balance, uptake, and transport processes in N₂-fixing and nitrate- and urea-dependent soybean plants. Plant Physiology, 69 (1), 171-178.
- JABLONSKI, L. M., WANG, X., CURTIS, P. S., 2002: Plant reproduction under elevated CO₂ conditions: a meta-analysis of reports on 79 crop and wild species. New Phytologist, 156 (1), 9-26.
- JAKOBSEN, S. T., 1995: Aerobic decomposition of organic wastes 2. Value of compost as a fertilizer. Resources, Conservation and Recycling, 13 (1), 57-71.
- JANSSEN, B. H., 1984: A simple method for calculating decomposition and accumulation of 'young' soil organic matter. Plant and Soil, 76 (1-3), 297-304.
- JANZEN, H. H. & BRUINSMA, Y., 1989: Methodology for the quantification of root and rhizosphere nitrogen dynamics by exposure of shoots to ¹⁵N-labelled ammonia. Soil Biology and Biochemistry, 21 (2), 189-196.
- JOHN, B., LUDWIG, B., POTTHOFF, M., FLESSA, H., 2004: Carbon and nitrogen mineralization after maize harvest between and within maize rows: a microcosm study using ¹³C natural abundance. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 167 (3), 270-276.

- JOHNSON, J. F., ALLAN, D. L., VANCE, C. P., WEIBLEN, G., 1996: Root carbon dioxide fixation by phosphorus-deficient *Lupinus albus* (contribution to organic acid exudation by proteoid roots). *Plant Physiology*, 112 (1), 19-30.
- JOST, B., 2003: Untersuchungen und Kalkulationstabellen zur Schätzung der N₂-Fixierleistung und der N-Flächenbilanz beim Anbau von *Lupinus albus* und *Lupinus luteus* in Reinsaat und von *Vicia faba* und *Pisum sativum* in Reinsaat und im Gemenge mit *Avena sativa*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- JUNG, R., 2003: Stickstoff-Fixierleistung von Luzerne (*Medicago sativa* L.), Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und Persischem Klee (*Trifolium resupinatum* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- JUNG, R. & RAUBER, R., 2010: Anbau von Ackerbohnen unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus bei differenzierter Bodenbearbeitung - Ergebnisse zur symbiotischen Stickstoff-Fixierung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Band 22, 179-180.
- KALLENBACH, C. & GRANDY, A. S., 2011: Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144 (1), 241-252.
- KANDELER, E., STEMMER, M., KLIMANEK, E. M., 1999: Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to long-term soil management. *Soil Biology and Biochemistry*, 31 (2), 261-273.
- KEELING, A. A., GRIFFITHS, B. S., RITZ, K., MYERS, M., 1995: Effects of compost stability on plant growth, microbiological parameters and nitrogen availability in media containing mixed garden-waste compost. *Bioresource Technology*, 54 (3), 279-284.
- KEELING, A. A., MCCALLUM, K. R., BECKWITH, C. P., 2003: Mature green waste compost enhances growth and nitrogen uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and oilseed rape (*Brassica napus* L.) through the action of water-extractable factors. *Bioresource Technology*, 90 (2), 127-132.
- KEHRES, B., 1995: Stand der Kompostierung sowie Qualität und Vermarktung (Status of composting including quality and marketing). *Biologische Abfallbehandlung II Kompostierung - Anaerobtechnik - Kalte Vorbehandlung - Klärschlammverwertung*. Witzenhausen, Germany: MIC Baeza Verlag, 103.

- KEHRES, B., 2011: Optimierung der Verwertung von Grünabfällen - Fehlsteuerungen korrigieren. Referat im Rahmen der Konferenz zur Energetischen Nutzung von Landschaftspflegematerial. Berlin.
- KELLING, K. A., MATOCHA, J. E., WESTERMAN, R. L., 1990: Plant analysis as an aid in fertilizing forage crops. *Soil Testing and Plant Analysis.*, (Ed. 3), 603-643.
- KERN, M., RAUSSEN, T., TURK, T., FRICKE, K., 2003: Energiepotenzial für Bio- und Grünabfall. In: FRICKE, K., (Hrsg.): Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen. Schriftenreihe des ANS, 355-374.
- KERN, M. & RAUSSEN, T., 2009: Potenzieller Beitrag der Bioabfallverwertung zur Energieversorgung. Bio- und Sekundärrohstoffverwertung V. Stofflich - Energetisch, 461-475.
- KEUHL, H. J., 1926: Messungen der Kohlensäure-Konzentration der Luft in und über landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Düngung*, 6 (5), 321-378.
- KICK, H., SAUERBECK, D. & FÜHR, F., 1965: Die Aufnahme von Kohlendioxid durch die Pflanzenwurzel. *Plant and Soil*, 22 (1), 99-111.
- KIRCHMANN, H., HABERHAUER, G., KANDELER, E., SESSITSCH, A., GERZABEK, M. H., 2004: Effects of level and quality of organic matter input on carbon storage and biological activity in soil: Synthesis of a longterm experiment. *Global Biogeochemical Cycles*, 18 (4).
- KLASNIK, A. & STEFFENS, G., 1996: Grünkomposteinsatz in der Landwirtschaft - Ergebnisse aus einem Feldversuch. *VDLUFA-Schriftenreihe* 44, 385-388.
- KLIMANEK, E. M. & SCHULZ, E., 1997: C/N-Transformationsprozesse beim Umsatz von organischer Primärschubstanz (OPS) im Boden. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 41 (6), 513-525.
- KLOTZBÜCHER, T., FILLEY, T. R., KAISER, K., KALBITZ, K., 2011: A study of lignin degradation in leaf and needle litter using ¹³C-labelled tetramethylammonium hydroxide (TMAH) thermochemolysis: Comparison with CuO oxidation and van Soest methods. *Organic Geochemistry*, 42 (10), 1271-1278.
- KNAPP, E. B., ELLIOTT, L. F., CAMPBELL, G. S., 1983: Microbial respiration and growth during the decomposition of wheat straw. *Soil Biology and Biochemistry*, 15 (3), 319-323.
- KOCH, W., 1957: Der Tagesgang der „Produktivität der Transpiration“. *Planta*, 48 (4), 418-452.

- KÖGEL-KNABNER, I., 2002: The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 34 (2), 139-162.
- KÖGEL-KNABNER, I., 2010: Organische Bodensubstanz. In: SCHEFFER F. & SCHACHT-SCHABEL, P., „Lehrbuch der Bodenkunde“, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 51-81.
- KOLENBRANDER, G. J., 1974: Efficiency of organic manure in increasing soil organic matter content. *Trans. International Congress of Soil Science*, 129-136.
- KÖPKE, U., 1994: Nährstoffkreislauf und Nährstoffmanagement unter dem Aspekt des Betriebsorganismus. In: MAYER, J., FAUL, O., RIES, M., GERBER, A., KÄRCHER, A. (Hrsg.): *Ökologischer Landbau - Perspektive für die Zukunft*. SÖL-Sonderausgabe Nr. 58, 54-113, Bad Dürkheim.
- KÖPKE, U., 1996: Symbiotische Stickstoff-Fixierung und Vorfruchtwirkung von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.). Verlag Dr. Köster, Berlin.
- KOVAČEVIĆ, V. & VUKADINOVIĆ, V., 1992: The potassium requirements of maize and soyabean on a high K-fixing soil. *South African Journal of Plant and Soil*, 9 (1), 10-13.
- KRANERT, M., GOTTSCHALL, R., BRUNS, C., HAFNER, G., 2010: Energy or compost from green waste? - a CO₂-based assessment. *Waste Management*, 30 (4), 697-701.
- KRULL, E. S., BESTLAND, E. A., GATES, W. P., 2002: Soil organic matter decomposition and turnover in a tropical Ultisol: evidence from $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and geochemistry. *Radiocarbon*, 44 (1), 93- 112.
- KRZYSCH, G., 1962: Der Verlauf der Bodenatmung während der Vegetationszeit und ihre Veränderung durch langjährige Düngungs- und Bodenbearbeitungsmaßnahmen (Dissertation, Technische Universität, Berlin).
- KTBL (Hrsg.), 2005: *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. Kuratorium für Technik Bauwesen und Landwirtschaft, 13. Auflage, Darmstadt, S. 219-225.
- KUTSCHERA, L., LICHTENEGGER, E., SOBOTIK, M., HAAS, D., 2009: *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues*. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- KUZYAKOV, Y., 2006: Sources of CO₂efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (3), 425-448.

- KUZYAKOV, Y., FRIEDEL, J. K., STAHR, K., 2000: Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 (11), 1485-1498.
- LAL, R., 1989: Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol. *Agroforestry Systems*, 8 (2), 97-111.
- LEMMERMANN, O. & ECKL, K., 1924: Über die Bedeutung des Stalldüngers und Gründüngers für die Kohlensäureernährung der Pflanzen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Düngung, A, Wissenschaftlicher Teil*, 3 (8), 47-57.
- LANDSBERG, E. C., 1986: Function of rhizodermal transfer cells in the Fe stress response mechanism of *Capsicum annuum* L. *Plant Physiology*, 82 (2), 511-517.
- LEMMERMANN, O. & WIEßMANN, H., 1924: Über den Verlauf der Kohlensäurebildung im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Düngung, A, Wissenschaftlicher Teil*, 3 (6), 387-395.
- LFL - SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) 2008: Umsetzung der Düngeverordnung, Hinweise und Richtwerte für die Praxis.
- LI, B. Y., ZHOU, D. M., CANG, L., ZHANG, H. L., FAN, X. H., QIN, S. W., 2007: Soil micronutrient availability to crops as affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications. *Soil and Tillage Research*, 96 (1), 166-173.
- LISK, D. J., GUTENMANN, W. H., RUTZKE, M., KUNTZ, H. T., CHU, G., 1992: Survey of toxicants and nutrients in composted waste materials. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 22 (2), 190-194.
- LIU, J., SCHULZ, H., BRANDL, S., MIEHTKE, H., HUWE, B., GLASER, B., 2012: Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175 (5), 698-707.
- LLOYD, J. & FARQUHAR, G. D., 1994: ^{13}C discrimination during CO_2 assimilation by the terrestrial biosphere. *Oecologia*, 99 (3-4), 201-215.
- LTZ AUGUSTENBERG (Hrsg.) 2008: Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft: Abschlussbericht 2008. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln.
- LUNDEGÅRDH, H., 1960: Pflanzenphysiologie. VEB Gustav Fischer Verlag Jena, 423-432.

- LUNDEGÅRDH, B., BOTEK, P., SCHULZOV, V., HAJŠLOV, J., STRÖMBERG, A., ANDERSSON, H. C., 2008: Impact of Different Green Manures on the Content of S-Alk(en)yl-L-cysteine Sulfoxides and L-Ascorbic Acid in Leek (*Allium porrum*). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56 (6), 2102-2111.
- LUNDGREN, J. & PETTERSSON, E., 2009: Combustion of horse manure for heat production. Biorecourse Technology, 100. Jg., (12), 3121-3126.
- LUPWAYI, N. Z., RICE, W. A., CLAYTON, G. W., 1999: Soil microbial biomass and carbon dioxide flux under wheat as influenced by tillage and crop rotation. Canadian Journal of Soil Science, 79 (2), 273-280.
- LÜTZOW, M. V., KÖGEL-KNABNER, I., EKSCHMITT, K., MATZNER, E., GUGGENBERGER, G., MARSCHNER, B., FLESSA, H., 2006: Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. European Journal of Soil Science, 57 (4), 426-445.
- LÜSCHER, A., HARTWIG, U. A., SUTER, D., NÖSBERGER, J., 2000: Direct evidence that symbiotic N₂ fixation in fertile grassland is an important trait for a strong response of plants to elevated atmospheric CO₂. Global Change Biology, 6 (6), 655-662.
- LUX, G., PÖTZSCH, F., SCHMIDTKE, K., 2013: Regulierung annueller Samenunkräuter durch den Einsatz von Grünguthäcksel unter Bedingungen des ökologischen Landbaus. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 312-315.
- LUX, G. & SCHMIDTKE, K., 2013: Düngung kohlenstoffreicher organischer Düngemittel zu Leguminosen. In: WILBOIS, K.-P., (Hrsg.): Steigerung der Wertschöpfung ökologisch angebauter Marktfrüchte durch Optimierung des Managements der Bodenfruchtbarkeit. Gesamtprojekt - Abschlussbericht, Forschungsinstitut für biologischen Landbau, Frankfurt am Main, (<http://orgprints.org/28973/1/28973-08OE004-11OE080-fibl-wilbois-2013-management-bodenfruchtbarkeit.pdf>), eingesehen im Oktober 2014.
- MACDUFF, J. H., JARVIS, S. C., DAVIDSON, I. A., 1996: Inhibition of N₂ fixation by white clover (*Trifolium repens* L.) at low concentrations of NO₃⁻ in flowing solution culture. Plant and Soil, 180 (2), 287-295.
- MÄDER, P., EDENHOFER, S., BOLLER, T., WIEMKEN, A., NIGGLI, U., 2000: Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. Biology and Fertility of Soils, 31 (2), 150-156.

- MAFONGOYA, P. L. & NAIR, P. K. R., 1997: Multipurpose tree prunings as a source of nitrogen to maize under semiarid conditions in Zimbabwe. *Agroforestry Systems*, 35 (1), 31-46.
- MAFONGOYA, P. L., NAIR, P. K. R., DZOWELA, B. H., 1998: Mineralization of nitrogen from decomposing leaves of multipurpose trees as affected by their chemical composition. *Biology and Fertility of Soils*, 27 (2), 143-148.
- MALLORY, E. B. & GRIFFIN, T. S., 2007: Impacts of soil amendment history on nitrogen availability from manure and fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 71 (3), 964-973.
- MANNA, M. C., SWARUP, A., WANJARI, R. H., MISHRA, B., SHAHI, D. K., 2007: Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 94 (2), 397-409.
- MANUNGUFALA, T. E., CHIMUKA, L., MASWANGANYI, B. X., 2008: Evaluating the quality of communities made compost manure in South Africa: A case study of content and sources of metals in compost manure from Thulamela Municipality, Limpopo province. *Bioresource Technology*, 99 (5), 1491-1496.
- MARSCHNER, B. & NOBLE, A. D., 2000: Chemical and biological processes leading to the neutralisation of acidity in soil incubated with litter materials. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 (6), 805-813.
- MARSCHNER, P., KANDELER, E., MARSCHNER, B., 2003: Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 35 (3), 453-461.
- MARY, B., MARIOTTI, A., MOREL, J. L., 1992: Use of ^{13}C variations at natural abundance for studying the biodegradation of root mucilage, roots and glucose in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 24 (10), 1065-1072.
- MARY, B., RECOUS, S., DARWIS, D., ROBIN, D., 1996: Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil*, 181(1), 71-82.
- MC GRATH, S. P. & ZHAO, F. J., 1996: Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *The Journal of Agricultural Science*, 126 (01), 53-62.
- MC NAUGHT, K. J. & CHRISSTOFFELS, P. J., 1961: Effect of sulphur deficiency on sulphur and nitrogen levels in pastures and lucerne. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 4 (1-2), 177-196.

- MENGEL, K., 1986: Umsatz im Boden und Ertragswirksamkeit rohphosphathaltiger Düngemittel. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 149 (6), 674-690.
- MENGEL, K., 1991: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag Jena, 7. Auflage.
- MENGEL, K., 2007: Potassium. In: BARKER, A. V. & PILBEAM, D. J., (Hrsg.) 2007: Handbook of Plant Nutrition. Taylor & Francis Group, London.
- MENGEL, K. & STEFFENS, D., 1982: Beziehung zwischen Kationen/Anionen-Aufnahme von Rotklee und Protonenabscheidung der Wurzeln. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 145 (3), 229-236.
- MENGEL, K. & STEFFENS, D., 1985: Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters. Biology and Fertility of Soils, 1 (1), 53-58.
- MICHAEL, G. & TROBISCH, S., 1961: Der Molybdänversorgungsgrad mitteldeutscher Ackerböden. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, 93 (1), 9-18.
- MINCHIN, F. R., BECANA, M., SPRENT, J. I., 1989: Short-term inhibition of legume N₂ fixation by nitrate. Planta, 180 (1), 46-52.
- MKHABELA, M. S. & WARMAN, P. R., 2005: The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. Agriculture, Ecosystems & Environment, 106 (1), 57-67.
- MOHANTY, M., SINHA, N. K., SAMMY REDDY, K., CHAUDHARY, R., S., SUBBA RAO, A., DALAL, R., C., MENZIES N., W., 2013: How important is the Quality of Organic Amendments in Relation to Mineral N Availability in Soils. Agricultural Research 2 (2), 99-110.
- MÖLLER, K. & SCHULTHEISS, U., 2014: Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau: Charakterisierung und Empfehlungen für die Praxis. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, KTBL-Schrift 499.
- MOORE-KUCERA, J. & DICK, R. P., 2008: Application of ¹³C-labeled litter and root materials for in situ decomposition studies using phospholipid fatty acids. Soil Biology and Biochemistry, 40 (10), 2485-2493.

- MOSS, D. N., MUSGRAVE, R. B., LEMON, E. R., 1961: Photosynthesis under field conditions. III. Some effects of light, carbon dioxide, temperature, and soil moisture on photosynthesis, respiration, and transpiration of corn. *Crop Science*, 1 (2), 83-87.
- MULDER, E. G., 1948: The microbiological estimation of copper, magnesium and molybdenum in soil and plant material. *Analytica Chimica Acta*, 2, 793-800.
- MÜLLER-STOLL, W. R. & GRABERT, D., 1970: Der Einfluß von Wind und Windschutz auf den CO₂-Gehalt der bodennahen Luftschicht über Feldkulturen. *Die Kulturpflanze*, 18 (1), 221-239.
- MUNSON, R. D., 1998: Principles of plant analysis. Handbook of reference methods for plant analysis, 1-24.
- MUNSON, R. D. & NELSON, W. L., 1990: Principles and Practices in Plant Analysis. In: Westermann, R. L.: Soil testing and plant analysis. 3rd edition. Soil Science Society of America, 359-388.
- MUNZERT, M., 1992: Einführung in das pflanzenbauliche Versuchswesen. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.
- MYLONA, P., PAWLOWSKI, K., BISSELING, T., 1995: Symbiotic nitrogen fixation. *The Plant Cell*, 7 (7), 869.
- NAKADAI, T., KOIZUMI, H., BEKKU, Y., TOTSUKA, T., 1996: Carbon dioxide evolution of an upland rice and barley, double cropping field in central Japan. *Ecological Research*, 11 (2), 217-227.
- NELSON, L. M., 1987: Variation in *Rhizobium leguminosarum* response to short term application of NH₄⁺ and NO₃⁻ to nodulated *Pisum sativum* L. *Plant and Soil*, 98 (2), 275-284.
- NETT, L., AVERESCH, S., RUPPEL, S., RÜHLMANN, J., FELLER, C., GEORGE, E., FINK, M. 2010: Does long-term farmyard manure fertilization affect short-term nitrogen mineralization from farmyard manure? *Biology and Fertility of Soils*, 46 (2), 159-167.
- NEUMANN, G. & RÖMHELD, V., 1999: Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant and Soil*, 211 (1), 121-130.
- NEVENS, F. & REHEUL, D., 2003: The application of vegetable, fruit and garden waste (VFG) compost in addition to cattle slurry in a silage maize monoculture: nitrogen availability and use. *European Journal of Agronomy*, 19 (2), 189-203.
- NIKLAS, H., SCHARRER, K., STROBEL, A., 1925: Die Bedeutung der Kohlensäure als Düngemittel. *Angewandte Chemie*, 38 (12), 251-258.

- NIEDER, R. & RICHTER, J., 1986: Einfluß der Strohdüngung auf den Verlauf der N-Mineralisation eines Löß-Parabraunerde Ap-Horizontes im Säulen-Brutversuch. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 149 (2), 202-210.
- NIEDER, R. & RICHTER, J., 1989: Die Bedeutung der Umsetzung von Weizenstroh im Hinblick auf den C- und N-Haushalt von Löß-Ackerböden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 152 (5), 415-420.
- NIEDERBUDDE, E. A., 1965: Röntgenographische Untersuchungen zur Deutung von K-Fixierungsunterschieden in Lößböden mit Tonverlagerung. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 4, 253-261.
- NISHANTH, D. & BISWAS, D. R., 2008: Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*). Bioresource Technology, 99 (9), 3342-3353.
- NOBLE, A. D., ZENNECK, I., RANDALL, P. J., 1996: Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity. Plant and Soil, 179 (2), 293-302.
- OBERSON, A., NANZER, S., BOSSHARD, C., DUBOIS, D., MÄDER, P., FROSSARD, E., 2007: Symbiotic N₂-fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by ¹⁵N dilution and ¹⁵N natural abundance. Plant and Soil, 290 (1-2), 69-83.
- OCIO, J. A., BROOKES, P. C., JENKINSON, D. S., 1991: Field incorporation of straw and its effects on soil microbial biomass and soil inorganic N. Soil Biology and Biochemistry, 23 (2), 171-176.
- OEHLER, T., 1930: Zur Frage der Erzeugung bodenbürtiger Kohlensäure. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, 9 (25/27), 415-421.
- O'LEARY, M. H., 1981: Carbon isotope fractionation in plants. Phytochemistry, 20 (4), 553-567.
- OLESEN, J. E., RASMUSSEN, I. A., ASKEGAARD, M., KRISTENSEN, K., 1999: Design of the Danish crop rotation experiment. In: OLESEN, J. E., ELTUN, R., GOODING, M. J., E. S. JENSEN, KÖPKE, U. (Hrsg.): Designing and Testing Crop Rotations for Organic Farming- Proceedings from an International workshop., 49-62, Tjele (Dänemark).
- OLOFSDOTTER, M., REBULANAN, M., MADRID, A., DALI, W., NAVAREZ, D., & OLK, D. C., 2002: Why phenolic acids are unlikely primary allelochemicals in rice. Journal of Chemical Ecology, 28 (1), 229-242.

- OTTOW, J. C., 2011: Mikrobiologie und Biochemie des Kohlenstoffkreislaufes. Mikrobiologie von Böden: Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik, 247-276.
- PALM, C. A. & SANCHEZ, P. A., 1991: Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biology and Biochemistry*, 23 (1), 83-88.
- PALM, C. A., GACHENGO, C. N., DELVE, R. J., CADISCH, G., GILLER, K. E., 2001: Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83 (1), 27-42.
- PAPE, H., SCHMIDT, S., STEFFENS, D., 2000: C-und N-Verbindungen aus Bioabfallkomposten und ihre Bedeutung für die N-Nachlieferung. In *Rhizodeposition und Stoffverwertung*, S. 13-18, Vieweg & Teubner Verlag.
- PARKINSON, K., J., 1981: An improved method for measuring soil respiration in the field. *Journal of Applied Ecology*, 18, 221-228
- PARNAS, H., 1975: Model for decomposition of organic material by microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 7 (2), 161-169.
- PAUL, J. W. & BEAUCAMP, E. G., 1989: Effect of carbon constituents in manure on denitrification in soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 69 (1), 49-61.
- PAUL, K. I., BLACK, A. S., CONYERS, M. K., 2001: Effect of plant residue return on the development of surface soil pH gradients. *Biology and Fertility of Soils*, 33 (1), 75-82.
- PAYAN-ZELAYA, F., HARMAND, J. M., FLORES-MACÍAS, A., BEER, J., RAMOS-ESPINOZA, G., DE LEÓN GONZÁLEZ, F., 2013: Soil nutrient availability and CO₂ production in agroforestry systems after the addition of *Erythrina poeppigiana* pruning residues and native microbial inocula. *Agroforestry Systems*, 87 (2), 439-450.
- PECHER, A., 1996: Wirkung der Strohdüngung in Fruchtfolgen mit unterschiedlichem Getreideanteil in einem 20-jährigen Dauerfeldversuch auf Tieflehm-Fahlerde. *VDLUFA-Schriftenreihe* 44, 619-622.
- PEKRUN, C., KAUL, H. P., CLAUPEIN, W., 2003: Soil tillage for sustainable nutrient management. *Soil Tillage in Agroecosystems*, 83-113.
- PENNING, H. & CONRAD, R., 2006: Carbon isotope effects associated with mixed-acid fermentation of saccharides by *Clostridium papyrosolvens*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (9), 2283-2297.

- PEOPLES, M. B., HERRIDGE, D. F., LADHA, J. K., 1995: Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant and Soil*, 174 (1-2), 3-28.
- PETERSEN, U., GOTTSCHALL, R., KÖLSCH, E., PFOTZER, G. H., SCHÜLER, C., STOEPPLE ZIMMER, H., VOGTMANN, H., 1996: Komposteinsatz im ökologischen Landbau-Pflanzenbauliche Ergebnisse aus einem zehnjährigen Feldversuch. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 44, 393-396.
- PERNER, H., SCHWARZ, D., BRUNS, C., MÄDER, P., GEORGE, E., 2007: Effect of arbuscular mycorrhizal colonization and two levels of compost supply on nutrient uptake and flowering of pelargonium plants. *Mycorrhiza*, 17 (5), 469-474.
- PESCHKE, H. & DÖLLING, S., 1994: Nachweis des Strohabbaues über die Stickstofffreisetzung aus ¹⁵N-markiertem Stroh. *Journal of Agronomy & Crop Sciences*, 173, 318-325.
- PETERSON, G. A., HALVORSON, A. D., HAVLIN, J. L., JONES, O., LYON, D. J., TANAKA, D. L., 1998: Reduced tillage and increasing cropping intensity in the Great Plains conserves soil C. *Soil and Tillage Research*, 47 (3), 207-218.
- POPP, L., EBERTSEDER, T., GUTSER, R., FISCHER, P., CLAASSEN, N., 1996: Prognose der kurzfristigen N-Wirkung von Komposten durch Kombination chemischer und biologischer Parameter. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 44, 397-400.
- PÖTZSCH, F., 2010: Einfluss von Grünguthäcksel auf Keimung und Wachstum von Unkräutern sowie Ertragsbildung von Körnerleguminosen im ökologischen Landbau. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- POWLSON, D. S., JENKINSON, D. S., PRUDEN, G., JOHNSTON, A. E., 1985: The effect of straw incorporation on the uptake of nitrogen by winter wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 36 (1), 26-30.
- PROBERT, M. E., DELVE, R. J., KIMANI, S. K., DIMES, J. P., 2005: Modelling nitrogen mineralization from manures: representing quality aspects by varying C: N ratio of sub-pools. *Soil Biology and Biochemistry*, 37 (2), 279-287.
- RASMUSSEN, K. J., 1999: Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. *Soil and Tillage Research*, 53 (1), 3-14.
- RASMUSSEN, P. E., ALBRECHT, S. L., SMILEY, R. W., 1998: Soil C and N changes under tillage and cropping systems in semi-arid Pacific Northwest agriculture. *Soil and Tillage Research*, 47 (3), 197-205.

- RAVEN, J. A., HANDLEY, L. L., MACFARLANE, J. J., MCINROY, S., MCKENZIE, L., RICHARDS, J. H., SAMUELSSON, G., 1988: The role of CO₂ uptake by roots and CAM in acquisition of inorganic C by plants of the isoetid life form: a review, with new data on *Eriocaulon decangulare* L. *New Phytologist*, 108 (2), 125-148.
- REICOSKY, D. C., 1997: Tillage-induced CO₂ emission from soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49 (1-3), 273-285.
- REITER, K., SCHMIDTKE, K., RAUBER, R., 2002: The influence of long-term tillage systems on symbiotic N₂ fixation of pea (*Pisum sativum* L.) and red clover (*Trifolium pratense* L.). *Plant and Soil*, 238, 41-55.
- RICHARDS, J. E. & SOPER, R. J., 1979: Effects of N fertilizer on yield, protein content and symbiotic N-fixation in Fababeans. *American Society of Agronomy*, 71 (5), 807-811.
- RICHARDS, J. E. & SOPER, R. J., 1979: Effects of N fertilizer on yield, protein content and symbiotic N-fixation in Fababeans. *American Society of Agronomy*, 71 (5), 807-811.
- RICHTER, J. V., 1972: Zur Methodik des Bodengashaushaltes I. Ökologisches Modell. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 132 (3), 208-219.
- RIFFEL, A., HORNISCHER, H., FISCHINGER, S. A., LEITHOLD, G., BECKER, K., 2013: Wirkung einer Schwefeldüngung zu einem Luzerne-Klee gras-Bestand auf den Kornertrag der Nachfrucht Winterweizen. *Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, Bonn, 214-215.
- RILEY, D. & BARBER, S. A., 1969: Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean (*Glycine max* L. Merr.) root-soil interface. *Soil Science Society of America Journal*, 33 (6), 905-908.
- ROCHETTE, P. & GREGORICH, E. G., 1998: Dynamics of soil microbial biomass C, soluble organic C and CO₂ evolution after three years of manure application. *Canadian Journal of Soil Science*, 78 (2), 283-290.
- RÖMER, W. & LEHNE, P., 2004: Vernachlässigte Phosphor- und Kaliumdüngung im ökologischen Landbau senkt die biologische Stickstofffixierung bei Rotklee und den Kornertrag bei nachfolgendem Hafer. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167 (1), 106-113.
- ROY, W. R., HASSETT, J. J., GRIFFIN, R. A., 1986: Competitive interactions of phosphate and molybdate on arsenate adsorption. *Soil Science*, 142 (4), 203-210.

- RÜDIGER, W. & LOHAUS, E., 1987: Germination and Growth Inhibitors as Allelochemicals. In: WALLER, G. R., (Hrsg.): Allelochemicals: Role in Agriculture and Forestry. American Chemical Society, Series 330, 118-128.
- RÜSCH, J. D. , 1955: Der CO₂ Gehalt bodennaher Luftschichten unter Einfluss des Windschutzes. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, 71 (2), 113-132.
- RYLE, G. J. A., POWELL, C. E., DAVIDSON, I. A., 1992: Growth of white clover, dependent on N₂ fixation, in elevated CO₂ and temperature. Annals of Botany, 70 (3), 221-228.
- SADAU, A., 2012: Pferdezüchtung und Leistungsprüfung in Deutschland. Referatsunterlagen, Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Frankfurt (Oder).
- SÄDBL- Statistische Ämter des Bundes und der Länder - (Hrsg.), 2011: Regionale Ergebnisse der Landwirtschaftszählung 2010. Stuttgart.
- SAGER, M., 2007: Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. Soil Biology and Biochemistry, 39 (6), 1383-1390.
- SAS Institute Inc., 2013: SAS 9.3, Rev. 930_13 w 14. SAS Institute GmbH, Heidelberg.
- SAUERBECK, D. & JOHNEN, B., 1976: Der Umsatz von Pflanzenwurzeln im Laufe der Vegetationsperiode und dessen Beitrag zur „Bodenatmung“. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 139 (3), 315-328.
- SCAIFE, A. & BURNS, I. G., 1986: The sulphate-S/total S ratio in plants as an index of their sulphur status. Plant and Soil, 91 (1), 61-71.
- SCHAAF, H., 1995: Düngen mit Kompost im integrierten Pflanzenbau – ein Kosten-Nutzen-Vergleich. In: RHINO, REINISCHES INSTITUT FÜR ÖKOLOGIE (Hrsg.): Kompost für die Landwirtschaft., Köln, 63-87.
- SCHAFFER, G., 1954: Atmungskurven des Bodens unter dem Einfluss langjähriger, verschiedenartiger Düngung. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, 67 (3), 219-230.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., 2010: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, neu bearbeitet von BLUME, H., KANDELER, E., STAHR, K., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SCHERER, H. W., 2001: Sulphur in crop production - invited paper. European Journal of Agronomy, 14 (2), 81-111.

- SCHERER, H. W. & MENGEL, K., 1981: Einfluss von Stroh und Nitrapyrin auf den verfügbaren Stickstoff im Boden, den Ertrag und den Stickstoffentzug von *Lolium multiflorum*. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 144 (3), 254-262.
- SCHERER, H. W. & MENGEL, K., 1983: Umsatz von ^{15}N markiertem Nitratstickstoff im Boden in Abhängigkeit von Strohdüngung und Bodenfeuchte. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 146 (1), 109-117.
- SCHERER, H. W. & LANGE, A., 1996: N_2 fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization. Biology and Fertility of Soils, 23 (4), 449-453.
- SCHERER, H. W., PACYNA, S., SPOTH, K. R., SCHULZ, M., 2008: Low levels of ferredoxin, ATP and leghemoglobin contribute to limited N_2 fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S-deficiency conditions. Biology and Fertility of Soils, 44 (7), 909-916.
- SCHILLING, G., 2000: Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 1. Auflage.
- SCHLESINGER, W. H. & LICHTER, J., 2001: Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO_2 . Nature, 411 (6836), 466-469.
- SCHMIDT, H. L. & GLEIXNER, G., 1998: Carbon isotope effects on key reactions in plant metabolism and ^{13}C -patterns in natural compounds. In: GRIFFITHS, H. (Hrsg.): Stable Isotopes: Integration of biological, ecological and geochemical processes. Oxford, 13-25.
- SCHMIDTKE, K., 2005: How to calculate nitrogen rhizodeposition: a case study in estimating N rhizodeposition in the pea (*Pisum sativum* L.) and grasspea (*Lathyrus sativus* L.) using a continuous ^{15}N labelling split-root technique. Soil Biology and Biochemistry, 37, 1893-1897.
- SCHMIDTKE, K., WUNDERLICH, B., LAUTER, J., WENDROCK, Y., KOLBE, H., 2015: Nährstoff- und Humusbilanz sowie Nährstoffversorgung im Boden in langjährig ökologisch bewirtschafteten Acker- und Grünlandflächen im Freistaat Sachsen. im Druck.
- SCHNEIDER, K., MÜLLER, A., SCHRAMM, U., KLIPP, W., 1991: Demonstration of a molybdenum and vanadium independent nitrogenase in a nifHD-deletion mutant of *Rhodobacter capsulatus*. European Journal of Biochemistry, 195 (3), 653-661.

- SCHNEIDER, K. & MÜLLER, A., 1999: Die biologische Stickstoff-Fixierung: Dem Geheimnis eines lebensnotwendigen Prozesses auf der Spur. Forschung an der Universität Bielefeld, 20, 43-49.
- SCHRÖDER, D. & GEWEHR, H., 1977: Stroh- und Zelluloseabbau in verschiedenen Bodentypen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 140 (34), 273-284.
- SCHUBERT, S., 2006: Pflanzenernährung, Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1. Auflage.
- SCHUBERT, S. & YAN, F., 1997: Nitrate and ammonium nutrition of plants: effects on acid/base balance and adaptation of root cell plasmalemma H^+ -ATPase. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 160 (2), 275-281.
- SCHÜLER, C., BIALA, J., VOGTMANN, H., 1989a: Antiphytopathogenic properties of biogenic waste compost. Agriculture, Ecosystems & Environment, 27 (1), 477-482.
- SCHÜLER, C., BIALA, J., BRUNS, C., GOTTSCHALL, R., AHLERS, S., VOGTMANN, H., 1989b: Suppression of root rot on peas, beans and beetroots caused by *Pythium ultimum* and *Rhizoctonia solani* through the amendment of growing media with composted organic household waste. Journal of Phytopathology, 127 (3), 227-238.
- SCHWEIZER, M., FEAR, J., CADISCH, G., 1999: Isotopic ^{13}C -Fractionation During Plant Residue Decomposition and its Implications for Soil Organic Matter Studies. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 13, 1284-1290.
- SHEARER, G. & KOHL, D., 1986: N_2 -fixation in field settings: estimations based on natural ^{15}N abundance. Functional Plant Biology, 13 (6), 699-756.
- SHIVASHANKAR, K. & VLASSAK, K., 1978: Influence of straw and CO_2 on N_2 -fixation and yield of field-grown soybeans. Plant and Soil, 49 (2), 259-266.
- SIX, J. A. E. T., ELLIOTT, E. T., PAUSTIAN, K., 2000: Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Soil Biology and Biochemistry, 32 (14), 2099-2103.
- SMITH, J. L., COLLINS, H. P., BAILEY, V. L., 2010: The effect of young biochar on soil respiration. Soil Biology and Biochemistry, 42 (12), 2345-2347.
- SMITH, B. N. & EPSTEIN, S., 1971: Two categories of $^{13}C/^{12}C$ ratios for higher plants. Plant Physiology, 47 (3), 380-384.

- SOUMARE, M., TACK, F. M. G., VERLOO, M. G., 2003: Effects of a municipal solid waste compost and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of Mali. *Bioresource Technology*, 86 (1), 15-20.
- SOUSSANA, J. F. & HARTWIG, U. A., 1995: The effects of elevated CO₂ on symbiotic N₂ fixation: a link between the carbon and nitrogen cycles in grassland ecosystems. *Plant and Soil*, 187 (2), 321-332.
- SPENCER, K., JONES, M. B., FRENEY, J. R., 1977: Diagnostic indices for sulphur status of subterranean clover. *Crop and Pasture Science*, 28 (3), 401-412.
- STEFFENS, D., 1996: Einfluß von Bioabfallkompost verschiedener Reifegrade auf die Bodenfruchtbarkeit. *VDLUFA-Schriftenreihe* 44, 405-408.
- STITT, M. & KRAPP, A., 1999: The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. *Plant, Cell & Environment*, 22 (6), 583-621.
- STOLWIJK, J. A. J. & THIMANN, K. V., 1957: On the Uptake of Carbon Dioxide and Bicarbonate by Roots, and Its Influence on Growth. *Plant Physiology*, 32 (6), 513.
- STOLZE, M., PIORR, A., HÄRING, A. M., DABBERT, S., 2000: Environmental impacts of organic farming in Europe. *Stuttgart-Hohenheim*, 35-41.
- STOUT, P. R., MEAGHER, W. R., PEARSON, G. A., JOHNSON, C. M., 1951: Molybdenum nutrition of crop plants. *Plant and Soil*, 3 (1), 51-87.
- STREBEL, O. & DUYNISVELD, W. H., 1989: Nitrogen supply to cereals and sugar beet by mass flow and diffusion on a silty loam soil. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 152 (2), 135-141.
- STÜLPNAGEL, R., 1982: Schätzung der von Ackerbohnen symbiontisch fixierten Stickstoffmenge im Feldversuch mit der erweiterten Differenzmethode. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau*, 151, 446-458.
- SVENNING, M. M., JUNTILA, O., MACDUFF, J. H., 1996: Differential rates of inhibition of N₂ fixation by sustained low concentrations of NH₄⁺ and NO₃⁻ in northern ecotypes of white clover (*Trifolium repens* L.). *Journal of Experimental Botany*, 47(6), 729-738.
- Systat Software Inc., 2008: SigmaPlot 11.0 s. Systat Software GmbH, Erkrath.
- SZOTT, L. T., PALM, C. A., SANCHEZ, P. A., 1991: Agroforestry in acid soils of the humid tropics. *Advances in Agronomy*, 45, 275-301.

- TAUBNER, H., EICKHORST, T., TIPPKÖTTER, R., 2009: Auswirkungen der direkten Grüngutapplikationen auf Ertrag und Bodeneigenschaften von Ackerböden. Die Bodenkultur, 27 (60), 27-38.
- THUMM, U., BÖHMEL, C., TONN, B., SCHULZ, H., CLAUPEIN, W., 2009: Energetische Verwertung des Schnittguts von Golfanlagen. European Journal of Turfgrass Science, 133.
- TIAN, G., KANG, B. T., BRUSSAARD, L., 1992: Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical condition - decomposition and nutrient release. Soil Biology and Biochemistry, 24 (10), 1051-1060.
- TIMMERMANN, F. & KLUGE, R., 1996: Direktverwertung von Grünguthäcksel im Ackerbau. VDLUFA-Schriftenreihe, 44, 533-536.
- TRIBERTI, L., NASTRI, A., GIORDANI, G., COMELLINI, F., BALDONI, G., TODERI, G., 2008: Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? European Journal of Agronomy, 29 (1), 13-20.
- TURLEY, D. B., PHILLIPS, M. C., JOHNSON, P., JONES, A. E., CHAMBERS, B. J., 2003: Long-term straw management effects on yields of sequential wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in clay and silty clay loam soils in England. Soil and Tillage Research, 71(1), 59-69.
- TYLER, K. B., LORENZ, O. A., TAKATORI, F. H., BISHOP, J. C., 1962: Urea nitrogen for potatoes. American Potato Journal, 39 (3), 89-99.
- VAHDAT, E., NOURBAKHS, F., BASIRI, M., 2011: Lignin content of range plant residues controls N mineralization in soil. European Journal of Soil Biology, 47(4), 243-246.
- VAN GINKEL, J. H., GORISSEN, A., POLCI, D., 2000: Elevated atmospheric carbon dioxide concentration: effects of increased carbon input in a *Lolium perenne* soil on microorganisms and decomposition. Soil Biology and Biochemistry, 32 (4), 449-456.
- VANLAUWE, B., GACHENGO, C., SHEPHERD, K., BARRIOS, E., CADISCH, G., PALM, C. A., 2005: Laboratory validation of a resource quality-based conceptual framework for organic matter management. Soil Science Society of America Journal, 69 (4), 1135-1145.
- VAN VUUREN, M. M., ROBINSON, D., SCRIMGEOUR, C. M., RAVEN, J. A., FITTER, A. H., 2000: Decomposition of ¹³C-labelled wheat root systems following growth at different CO₂ concentrations. Soil Biology and Biochemistry, 32 (3), 403-413.

- VARIN, S., CLIQUET, J. B., PERSONENI, E., AVICE, J. C., LEMAUVEL-LAVENANT, S., 2010: How does sulphur availability modify N acquisition of white clover (*Trifolium repens* L.)? *Journal of Experimental Botany*, 61 (1), 225-234.
- VERONA, O., 1971: Mikrobiologische Gesichtspunkte beim Einpflügen von Stroh in den Boden. *Landtechnische Forschung*, 24, 139-151.
- VOGTMANN, H., MATTHIES, K., KEHRES, B., MEIER-PLOEGER, A., 1993: Enhanced food quality: effects of composts on the quality of plant foods. *Compost Science & Utilization*, 1 (1), 82-100.
- WAHID, O. A. A. & MEHANA, T. A., 2000: Impact of phosphate-solubilizing fungi on the yield and phosphorus-uptake by wheat and faba bean plants. *Microbiological Research*, 155 (3), 221-227.
- WARMAN, P. R., 1987: The effects of pruning, fertilizers, and organic amendments on lowbush blueberry production. *Plant and Soil*, 101 (1), 67-72.
- WATSON, C. A., BENGTSSON, H., EBBESVIK, M., LØES, A. K., MYRBECK, A., SALOMON, E., SCHRODER, J., STOCKDALE, E. A., 2002a: A review of farm scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. *Soil Use and Management*, 18, 264-273.
- WATSON, C. A., ATKINSON, D., GOSLING, P., JACKSON, L. R., RAYNS, F. W., 2002b: Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management*, 18, 239-247.
- WEDIN, D. A., TIESZEN, L. L., DEWEY, B., PASTOR, J., 1995: Carbon isotope dynamics during grass decomposition and soil organic matter formation. *Ecology*, 76 (5), 1383-1392.
- WEIGAND, H. & BERTAU, M., 2014: Von der Klärschlammasche zum Phosphordünger RecoPhos P38 im Spannungsfeld von Abfall-, Düngemittel- und Bodenschutzrecht. In: KAUSCH, P., BERTAU, M., GUTZMER, J., MATSCHULLAT, J., (Hrsg.): *Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge* (183-198), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- WEIGEL, H.-J., WALOSZCZYK, K., PACHOLSKI, A., FRÜHAUF, C., 2006: Zur Wirkung erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen in einer Fruchtfolge: Beispiele aus dem Braunschweiger Kohlenstoffprojekt. *Landbauforschung Völkenrode*, 56 (3-4), 101-115.
- WELCH, R. M. & SHUMAN, L., 1995: Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 14 (1), 49-82.

- WELTZIEN, H. C., 1989: Some effects of composted organic materials on plant health. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 27 (1), 439-446.
- WERTH, M., SUBBOTINA, I., KUZYAKOV, Y., 2006: Three-source partitioning of CO₂ efflux from soil planted with maize by ¹³C natural abundance fails due to inactive microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (9), 2772-2781.
- WHEELER, E. & SMITH, J., 2002: Horse stable manure management. Penn State's College of Agricultural Sciences.
- WILDUNG, R. E., GARLAND, T. R., BUSCHBOM, R. L., 1975: The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 7 (6), 373-378.
- WILLIAMS, R. J. B., STOJKOVSKA, A., COOKE, G. W., WIDDOWSON, F. V., 1960: Effects of fertilizers and farmyard manure on the copper, manganese, molybdenum and zinc removed by arable crops at Rothamsted. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 11 (10), 570-575.
- WILSON, S. B., STOFFELLA, P. J., GRAETZ, D. A., 2002: Development of compost-based media for containerized perennials. *Scientia Horticulturae*, 93 (3), 311-320.
- WINKLER, F. J. & SCHMIDT, H. L., 1980: Einsatzmöglichkeiten der ¹³C-Isotopen-Massenspektrometrie in der Lebensmitteluntersuchung. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 171 (2), 85-94.
- WINTER, A. G., PEUSS, H., SCHÖNBECK, F., 1959: Untersuchungen über die Aufnahme organischer Substanzen durch die Wurzeln höherer Pflanzen. I. Phenolische Verbindungen. *Naturwissenschaften*, 46 (18), 536-537.
- WOLFE, D. W. & ERICKSON, J. D., 1993: Carbon dioxide effects on plants: Uncertainties and Implications. In: KAISER, H. M. & DRENNEN, T. E. (Hrsg): *Agricultural dimensions of global climate change*. 153-178.
- XU, J. M., TANG, C. & CHEN, Z. L., 2006: The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (4), 709-719.
- YAN, F., SCHUBERT, S., MENGEL, K., 1996: Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic anions. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (4), 617-624.
- YU, M., HU, C. X., WANG, Y. H., 2002: Molybdenum efficiency in winter wheat cultivars as related to molybdenum uptake and distribution. *Plant and Soil*, 245 (2), 287-293.

- ZALLER, J. G. & KÖPKE, U., 2004: Effects of traditional and biodynamic farmyard manure amendment on yields, soil chemical, biochemical and biological properties in a long-term field experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 40 (4), 222-229.
- ZANETTI, S., HARTWIG, U. A., LUSCHER, A., HEBEISEN, T., FREHNER, M., FISCHER, B. U., HENDRREY, G. R., BLUM, H., NÖSBERGER, J., 1996: Stimulation of symbiotic N₂ fixation in *Trifolium repens* L. under elevated atmospheric pCO₂ in a grassland ecosystem. *Plant Physiology*, 112 (2), 575-583.
- ZHAO, F. J., WOOD, A. P., MCGRATH, S. P., 1999: Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil*, 212 (2), 207-217.
- ZHELJAZKOV, V. D., ASTATKIE, T., CALDWELL, C. D., MACLEOD, J., GRIMMETT, M., 2006: Compost, manure, and gypsum application to timothy/red clover forage. *Journal of Environmental Quality*, 35 (6), 2410-2418.
- ZORN, W. & WAGNER, S., 2010: Nährstoffversorgung ökologisch bewirtschafteter Ackerflächen sowie Konsequenzen für die Düngung. In: THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (Hrsg): Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen (8), Jena, 38-43.

Anhang

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abb. A 1: Versuchsanordnung zu Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009, einfaktorielle Blockanlage mit Unterteilung der Großparzellen in jeweils drei Kleinparzellen.....	191
Abb. A 2: Versuchsanordnung zu Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2009 und 2010, zweifaktorielle Blockanlage mit Unterteilung der Großparzellen in jeweils vier Kleinparzellen	192
Abb. A 3: Anordnung der Parzellen und Gefäße mit Strohdüngung zu Rotklee in den Jahren 2011 und 2012	193
Abb. A 4: Ausgebrachte Düngemittel vor der Saat von Saatplatterbse im Juli 2008	194
Abb. A 5: Messung der Bodenatmung in Saatplatterbse im September 2008.....	194
Abb. A 6: Ausgebrachte Düngemittel vor der Saat von Ackerbohne und Rotklee im März 2010	195
Abb. A 7: Eingehauste Gefäße mit Rotklee im Freiland, Mai 2012	195

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tab. A 1: Ablauf der durchgeführten Maßnahmen in den Feldversuchen mitorganischer Düngung zu Saatplatterbse (SP), Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) einschließlich Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2008bis 2011	196
Tab. A 2: Ablauf der durchgeführten Maßnahmen mit Strohdüngung zu Rotklee im Gewächshaus und im Feld in den Jahren 2011 und 2012	197
Tab. A 3: Analyse der Stoffgehalte sowie des Anteils an ^{13}C und ^{15}N Isotopen der eingesetzten organischen Düngemittel und von Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2008 bis 2011	198
Tab. A 4: Vegetationszeit des Rotklees und Analyse der Stoffgehalte sowie des Anteils an ^{13}C - und ^{15}N -Isotopen des eingesetzten Stroh und des Rotklees in den Jahren 2011 und 2012	199
Tab. A 5: Gehalt an Trockensubstanz und Gehalt an Nährstoffen in der Trockenmasse der eingesetzten organischen Düngemittel zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2008 bis 2010	200
Tab. A 6: Mengen an Nährstoffen, welche mit den eingesetzten Düngemitteln zu Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009 ausgebracht wurden	201
Tab. A 7: Mengen an Nährstoffen, welche mit den eingesetzten Düngemitteln zu Ackerbohne und Rotklee	202
Tab. A 8: Bodenatmung bei Saatplatterbse zu 7 Terminen im Jahr 2008	203
Tab. A 9: Bodenatmung bei Ackerbohne zu 4 Terminen im Jahr 2009	204
Tab. A 10: Bodenatmung bei Ackerbohne zu 5 Terminen im Jahr 2010	205
Tab. A 11: N_{min} -Vorrat im Boden zu Saatplatterbse und nachfolgendem Winterweizen in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 / 2009 und 2009 / 2010	206
Tab. A 12: Gehalte an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium im Spross der Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung	207
Tab. A 13: Gehalte an Schwefel, Molybdän und Bor im Spross der Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung	208

Tab. A 14: Entzug von Phosphor, Kalium und Magnesium durch Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung.....	209
Tab. A 15: Entzug von Schwefel, Molybdän und Bor durch Saatplatt- erbse in Abhängigkeit der Düngung.....	210
Tab. A 16: Feldaufgang und Spross-TM von Saatplatterbse und Welschem Weidelgras in Abhängigkeit der Düngung	211
Tab. A 17: Ertrag, Bestandesdichte und Tausendkornmasse von Winter- weizen nach Saatplatterbse in den Jahren 2009 und 2010	212
Tab. A 18: Rohprotein- und N-Gehalt sowie N-Entzug von Winterweizen nach Saatplatterbse in den Jahren 2009 und 2010.....	213
Tab. A 19: Spross-N der Saatplatterbse und des Welschen Weidel- grases sowie Entzug von Stickstoff aus dem Boden und symbiotische N ₂ -Fixierung der Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 und 2009.....	214
Tab. A 20: Rohproteingehalt im Korn von Winterweizen nach Vorfrucht Saatplatterbse in den Jahren 2009 und 2010	215
Tab. A 21: N _{min} -Vorräte im Boden zu Ackerbohne im Jahr 2009 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2010	216
Tab. A 22: N _{min} -Vorräte im Boden zu Ackerbohne im Jahr 2010 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2011	217
Tab. A 23: N _{min} -Mengen im Boden zu Rotklee im Jahr 2009 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2010	218
Tab. A 24: N _{min} -Mengen im Boden zu Rotklee im Jahr 2010 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2011	219
Tab. A 25: Gehalte an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium im Blatt von Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010	220
Tab. A 26: Gehalte an Schwefel, Molybdän und Bor im Blatt von Acker- bohne in den Jahren 2009 und 2010	221
Tab. A 27: Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Schnittgut des Rotklees (1. Schnitt).....	222
Tab. A 28: Gehalte an Molybdän und Bor im Spross Schnittgut des Rotklees (1. Schnitt).....	223

Tab. A 29: Entzug von Stickstoff, Phosphor und Kalium mit dem Schnittgut des Rotklee (1. Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010	224
Tab. A 30: Entzug von Molybdän und Bor mit dem Schnittgut des Rotklee (1. Schnitt)	225
Tab. A 31: Gehalte an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium im Spross von Rotklee (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010	226
Tab. A 32: Gehalte an Schwefel, Molybdän und Bor im Spross von Rotklee (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010	227
Tab. A 33: Entzug von Phosphor, Kalium und Magnesium mit dem Spross des Rotklee (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010	228
Tab. A 34: Entzug von Schwefel, Molybdän und Bor mit dem Spross des Rotklee (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010	229
Tab. A 35: Mittelwerte und <i>P</i> -Werte der Einzeljahre von Feldaufgang, Feldaufgang, Bestandesdichte, Hülsendichte und TKM der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010	230
Tab. A 36: Mittelwerte und <i>P</i> -Werte der Einzeljahre der Trockenmasse an Korn, Stroh und Unkraut der Ackerbohne	231
Tab. A 37: Feldaufgang und Spross-TM des Rotklee und der Referenzkultur Welsches Weidelgras in den Jahren 2009 und 2010	232
Tab. A 38: Schnittgut-TM des Rotklee, Schnitt 1 bis 3 und Stoppel in den Jahren 2009 und 2010	233
Tab. A 39: Spross-N der Ackerbohne (Korn und Stroh) und des Spitzwegerichs sowie Entzug von Stickstoff aus dem Boden und symbiotische N ₂ -Fixierung der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010	234
Tab. A 40: Spross-N von Rotklee (3 Schnitte + Stoppel) und von Welschem Weidelgras (3 Schnitte) sowie Entzug von Stickstoff aus dem Boden und symbiotische N ₂ -Fixierung von Rotklee in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2009 und 2010	235

Tab. A 41: Korn- und Stroh-TM, sowie Bestandesdichte und Tausend- kornmasse des Winterweizens nach Vorfrucht Ackerbohne	236
Tab. A 42: Korn- und Stroh-TM, sowie Bestandesdichte und Tausend- kornmasse des Winterweizens nach Vorfrucht Rotklee	236
Tab. A 43: N-Entzug mit dem Korn und dem Stroh des Winterweizens nach Vorfrucht Ackerbohne und Rotklee	238
Tab. A 44: Bodenatmung unter Rotklee [$\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ CO}_2$] zu acht Terminen im Jahr 2011 und zu 15 Terminen im Jahr 2012.....	239
Tab. A 45: Ergebnis des zweifaktoriellen Mittelwertvergleiches zum Einfluss der Strohdüngung und des Schnitttermines auf den Schnittgutertrag des Rotklees	240
Tab. A 46: Ergebnis des zweifaktoriellen Mittelwertvergleiches der $\delta^{15}\text{N}$ - Werte (‰) im Spross des Rotklees in Abhängigkeit von der Düngung und dem Schnitttermin.....	240
Tab. A 47: Ergebnisse des Mittelwertvergleiches der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Schnittgut des Rotklees nach Düngung mit nicht ^{13}C - markiertem und ^{13}C -markiertem Stroh im Freiland im Jahr 2011 und 2012	241
Tab. A 48: N-Entzug der Referenzkulturen Welsches Weidelgras (Saat- platterbse 2008 und 2009), Spitzwegerich (Ackerbohne 2009 und 2010) und Welsches Weidelgras (Rotklee 2009 und 2010) in Abhängigkeit der Düngung.....	241

Block 4	IV	I	II	V	VI	III
Block 3	VI	III	V	II	IV	I
Block 2	II	IV	VI	I	III	V
Block 1	I	II	III	IV	V	VI

A	B	C
---	---	---

Großparzelle:

- I Stroh
- II Grüngutkompost
- III Pferdemist
- IV Mineralisch
- V Kalk
- VI Kontrolle

Kleinparzelle:

- A Welsches Weidelgras
- B Saatplatterbse (Mess-, Ernteparzelle)
- C Saatplatterbse (Nachfruchtparzelle)

Abb. A 1: Versuchsanordnung zu Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009, einfaktorielle Blockanlage mit Unterteilung der Großparzellen (Römische Ziffern) in jeweils drei Kleinparzellen (Buchstaben)

Block 4	IV	I	II	V	VI	III
Block 3	II	IV	VI	I	III	V
Block 2	VI	III	V	II	IV	I
Block 1	I	II	III	IV	V	VI

A	B	C
		D

Großparzelle:

I	Kontrolle
II	Mineralisch
III	Kalk
IV	Gehölzhäcksel
V	Pferdemist
VI	Grüngutkompost

Kleinparzelle:

A	Ackerbohne
B	Rotklee
C	Welsches Weidelgras
D	Spitzwegerich

Abb. A 2: Versuchsanordnung zu Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2009 und 2010, zweifaktorielle Blockanlage mit Unterteilung der Großparzellen (Römische Ziffern) in jeweils vier Kleinparzellen (Buchstaben)

Block 1

Block 2

Block 3

Block 4

I II	I II	I II	I II
I II	I II	I II	I II

(I) A B	(II)
(I) C	(II)

Großparzelle:

Weiß

Kontrolle

Grau

Strohdüngung

Topfanordnung:

A

Stroh ¹³C-markiert

B

Stroh unmarkiert

C

Kontrolle

Kleinparzelle:

I

Rotklee

II

Welsches Weidelgras

Abb. A 3: Anordnung der Parzellen und Gefäße mit Strohdüngung zu Rotklee in den Jahren 2011 und 2012



Abb. A 4: Ausgebrachte Düngemittel vor der Saat von Saatplatterbse im Juli 2008



Abb. A 5: Messung der Bodenatmung in Saatplatterbse im September 2008



Abb. A 6: Ausgebrachte Düngemittel vor der Saat von Ackerbohne und Rotklee im März 2010



Abb. A 7: Eingehauste Gefäße mit Rotklee im Freiland, Mai 2012

Tab. A 1: Ablauf der durchgeführten Maßnahmen in den Feldversuchen mit organischer Düngung zu Saatplatterbse (SP), Ackerbohne (AB) und Rotklee (RK) einschließlich Nachfrucht Winterweizen in den Jahren 2008 bis 2011

Maßnahme	Kultur					
	Saatplatterbse		Ackerbohne		Rotklee	
	2008	2009	2009	2010	2009	2010
Bodenbearbeitung	16.07.	08.07.	03.03.	11.03.	03.03.	11.03.
Düngung & Saat	17.07.	16.07.	02.04.	19.03.	02.04.	19.03.
Windschutz	19.07.	20.07.	25.05.	08.04.	25.05.	08.04.
Bodenatmung 1	24.07.	-	27.04.	07.04.	-	-
Bodenatmung 2	03.08.	-	16.05.	06.06.	-	-
Bodenatmung 3	07.08.	-	28.05.	13.06.	-	-
Bodenatmung 4	14.08.	-	21.08.	06.07.	-	-
Bodenatmung 5	22.08.	-	-	21.07.	-	-
Bodenatmung 6	16.09.	-	-	-	-	-
Bodenatmung 7	03.10.	-	-	-	-	-
Zwischenernte 1	-	-	-	-	10.07.	28.06.
Zwischenernte 2	-	-	-	-	24.08.	10.08.
Blattentnahme	-	-	17.06.	02.07.	-	-
Blattauffang	-	-	13.07.	05.07.	-	-
Blattauffang	-	-	18.07.	12.07.	-	-
Blattauffang	-	-	24.07.	22.07.	-	-
Blattauffang	-	-	12.08.	30.07.	-	-
Handernte	20.10.	21.10.	31.08.	09.08.	14.10.	04.10.
Parzellendrusch	-	-	08.09.	22.08.	-	-
Bodenbearbeitung	03.11.	31.10.	31.10.	11.10.	31.10.	11.10.
Saat Weizen	05.11.					
Handernte Weizen	08.08.	27.07.	27.07.	13.07.	27.07.	13.07.
Parzellendrusch Weizen		02.08.	02.08.		02.08.	
N _{min} -Beprobung	Termine siehe Kapitel Ergebnisse Abb. 6, Abb. 17 und Abb. 18					

Tab. A 2: Ablauf der durchgeführten Maßnahmen mit Strohdüngung zu Rotklee
im Gewächshaus und im Feld in den Jahren 2011 und 2012

Maßnahme	Gewächshaus	Freiland	
	Rotklee 2011	Rotklee 2011	Rotklee 2012
Bodenbearbeitung	-	19.04.	27.03.
Strohdüngung & Saat	26.01.	20.04.	28.03.
Installation Umhausung	05.02.	28.04.	03.04.
NPK-Düngung	21.02.	24.05.	30.04.
Schnitt 1	05.04.	14.07.	13.06.
Schnitt 2	27.04.	09.08.	10.07.
Schnitt 3	23.05.	04.09.	16.08.
Schnitt 4	19.06.	06.10.	28.09.
Schnitt 5	19.07.	-	-
Schnitt 6	04.09.	-	-
Messung Bodenatmung	-	Terminübersicht siehe Tab. A 44	

Tab. A 3: Analyse der Stoffgehalte sowie des Anteils an ^{13}C und ^{15}N -Isotopen der eingesetzten organischen Düngemittel und von Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2008 bis 2011

Kultur	BBCH-Stadium	Pflanzenteil	Vegeta-tionstage	Analysen
Saatplatterbse 2008	65/75	Spross	96	C,N,P,K,Mg, S,Mo,B, ¹³ C,
Saatplatterbse 2009	65/75	Spross	98	
Ackerbohne 2009	65	Blatt	77	C,N,P,K,Mg, S,Mo,B
Ackerbohne 2009	95/97	Spross	152	C, N, ¹³ C, ¹⁵ N
Ackerbohne 2010	73	Blatt	106	C,N,P,K,Mg, S,Mo,B
Ackerbohne 2010	95/97	Spross	144	C, N, ¹³ C, ¹⁵ N
Rotklee 2009 1. Schnitt	68	Schnittgut	100	C,N,P,K,Mg, S,Mo,B, ¹³ C, ¹⁵ N (Mischprobe)
Rotklee 2009 2. Schnitt	68	Schnittgut	145	
Rotklee 2009 3. Schnitt	68	Schnittgut + Stoppel	196	
Rotklee 2010 1. Schnitt	68	Schnittgut	102	C,N,P,K,Mg, S,Mo, B, ¹³ C, ¹⁵ N (Mischprobe)
Rotklee 2010 2. Schnitt	68	Schnittgut	145	
Rotklee 2010 3. Schnitt	68	Schnittgut + Stoppel	200	
Weizen nach SP 2008	92	Korn, Stroh	277	C, N
Weizen nach SP 2009	92	Korn, Stroh	270	C, N
Weizen nach AB/RK 2009	92	Korn, Stroh	270	C, N
Weizen nach AB/RK 2010	92	Korn, Stroh	276	C, N
Grüngutkompost (2008 bis 2010)				C,N,P,K,Mg, S,Mo,B, ¹³ C
Pferdemist (2008 bis 2010)				
Gehölzhäcksel (2009 bis 2010)				
Stroh (2008 bis 2009)				

Tab. A 4: Vegetationszeit des Rotklees und Analyse der Stoffgehalte sowie des Anteils an ^{13}C - und ^{15}N -Isotopen des eingesetzten Stroh und des Rotklees in den Jahren 2011 und 2012

Versuch	Vegetationstage	Analysen
2011 Gewächshaus 1.Schnitt	70	C _t , N _t , ¹⁵ N, ¹³ C
2011 Gewächshaus 2.Schnitt	92	
2011 Gewächshaus 3.Schnitt	118	
2011 Gewächshaus 4.Schnitt	145	
2011 Gewächshaus 5.Schnitt	175	
2011 Gewächshaus 6.Schnitt	222	
2011 Freiland 1.Schnitt	86	C _t , N _t , ¹³ C
2011 Freiland 2.Schnitt	112	
2011 Freiland 3.Schnitt	138	
2011 Freiland 4.Schnitt	170	
2012 Freiland 1.Schnitt	78	C _t , N _t , ¹³ C
2012 Freiland 2.Schnitt	105	
2012 Freiland 3.Schnitt	142	
2012 Freiland 4.Schnitt	185	

Tab. A 5: Gehalt an Trockensubstanz und Gehalt an Nährstoffen in der Trockenmasse der eingesetzten organischen Düngemittel zu Saatplatterbse, Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2008 bis 2010

Prüfglieder	Saatplatterbse 2008									
	TS	C _t	N _t	C/N	P	K	Mg	S	B	Mo
	[%]								[mg kg ⁻¹]	
Grüngutkompost	75,0	19,4	1,27	15	0,25	1,33	0,42	0,19	n.b.	n.b.
Pferdemist	35,0	41,3	1,73	24	0,35	2,18	0,30	0,20	n.b.	n.b.
Stroh	86,1	43,8	0,46	95	0,14	0,54	0,05	0,10	n.b.	n.b.
Saatplatterbse 2009										
Grüngutkompost	55,5	19,7	0,92	21	0,17	0,72	0,34	0,12	18,8	1,81
Pferdemist	36,0	39,7	1,10	36	0,16	3,34	0,23	0,32	10,4	1,10
Stroh	89,9	45,9	0,57	81	0,12	0,75	0,05	0,10	3,02	0,22
Ackerbohne und Rotklee 2009										
Grüngutkompost	56,3	28,6	1,58	18	0,24	1,13	0,52	0,22	18,8	2,91
Pferdemist	23,0	40,1	1,03	39	0,17	1,66	0,12	0,18	6,0	2,23
Gehölzhäcksel	50,3	45,7	0,74	62	0,12	0,63	0,12	0,10	20,2	0,83
Ackerbohne und Rotklee 2010										
Grüngutkompost	55,9	16,3	1,01	16	0,18	0,93	0,40	0,14	85,8	5,30
Pferdemist	32,6	44,6	1,24	36	0,20	1,63	0,25	0,27	31,9	1,32
Gehölzhäcksel	59,4	39,6	0,88	45	0,09	0,41	0,17	0,09	64,0	0,48

Tab. A 6: Mengen an Nährstoffen, welche mit den eingesetzten Düngemitteln zu Saatplatterbse in den Jahren 2008 und 2009 ausgebracht wurden

Prüfglieder	Menge [dt ha ⁻¹]	Nährstoffe [kg ha ⁻¹]						
Saatplatterbse 2008								
		C	N	P	K	Mg	S	Ca
Kohlensaurer Kalk	53		-	-	-	-	-	2030
Dolophos/Kaliumsulfat	11,8/5,6	-	-	78	230	52	100	307
Grüngutkompost	455 ¹	8827	577	114	604	192	84	n.b.
Pferdemist	200 ¹	8236	345	70	436	59	40	n.b.
Stroh	99 ¹	4337	46	14	54	5	10	n.b.
Saatplatterbse 2009								
Kohlensaurer Kalk	53		-	-	-	-	-	2030
Dolophos/Kaliumsulfat	11,8/5,6	-	-	78	230	52	100	307
Grüngutkompost	509 ¹	10000	468	87	366	173	61	n.b.
Pferdemist	252 ¹	10000	277	40	842	58	81	n.b.
Stroh	105 ¹	5000	62	13	82	5	11	n.b.

¹ Trockenmasse

Tab. A 7: Mengen an Nährstoffen, welche mit den eingesetzten Düngemitteln zu Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2009 und 2010 ausgebracht wurden

Prüfglieder	Menge	Nährstoffe								
Ackerbohne und Rotklee 2009										
	[dt ha ⁻¹]	C	N	P	K	Mg	S	Ca	B	Mo
		[kg ha ⁻¹]							[g ha ⁻¹]	
Kohlensaurer Kalk	53		-	-	-	-	-	2030	-	-
Dolophos/Kaliumsulfat	15,5/9,6	-	-	102	399	62	173	403	-	-
Grüngutkompost	349 ¹	9992	551	83	394	181	77	n.b.	656	102
Pferdemist	249 ¹	9985	256	42	413	30	45	n.b.	149	56
Gehölzhäcksel	219 ¹	10008	162	26	137	26	22	n.b.	442	18
Ackerbohne und Rotklee 2010										
Kohlensaurer Kalk	53		-	-	-	-	-	2030	-	-
Dolophos/Kaliumsulfat	15,5/9,6	-	-	102	399	62	173	403	-	-
Grüngutkompost	612 ¹	9971	618	110	569	242	86	n.b.	524	324
Pferdemist	224 ¹	10006	278	45	365	57	61	n.b.	72	30
Gehölzhäcksel	253 ¹	10009	222	23	103	42	23	n.b.	161	12

¹ Trockenmasse

Tab. A 8: Bodenatmung bei Saatplatterbse zu 7 Terminen im Jahr 2008 [$\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$]

Prüfglieder	Messdatum						
	24.07.2008	03.08.2008	07.08.2008	14.08.2008	22.08.2008	16.09.2008	03.10.2008
Kontrolle	423,3 ±22 b	625,8 ±48 a	573,3 ±38 a	814,4 ±28 a	589,4 ±110 a	428,8 ±33 b	569,4 ±52 abc
Kalk	432,5 ±24 b	614,2 ±81 a	548,3 ±59 a	1111,9 ±128 a	728,8 ±61 a	446,3 ±28 b	474,4 ±28 c
Mineral	426,7 ±54 b	574,2 ±34 a	704,2 ±109 a	821,9 ±99 a	711,9 ±216 a	451,9 ±45 b	505,6 ±52 bc
Grüngutkompost	470,0 ±47 b	630,0 ±61 a	585,0 ±52 a	997,5 ±242 a	865,0 ±212 a	450,6 ±75 ab	565,6 ±40 abc
Pferdemist	1046,7 ±185 a	841,7 ±76 a	940,1 ±108 a	1355,6 ±331 a	1271,3 ±276 a	711,3 ±117 b	718,8 ±78 a
Stroh	1239,2 ±122 a	804,2 ±42 a	677,5 ±138 a	1391,9 ±211 a	1186,9 ±312 a	866,3 ±129 a	701,3 ±43 ab
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung × Termin							
Termin	A	A	A	A	A	A	A

Tab. A 9: Bodenatmung bei Ackerbohne zu 4 Terminen im Jahr 2009 [$\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$]

Prüfglieder	Messdatum			
	27.04.2009	16.05.2009	28.05.2009	21.08.2009
Kontrolle	323,1 \pm 36 ab	411,7 \pm 45 ab	429,2 \pm 78 b	485,3 \pm 47 a
Kalk	319,7 \pm 45 ab	370,4 \pm 24 ab	433,3 \pm 76 b	605,9 \pm 120 a
Mineral	221,9 \pm 31 b	298,3 \pm 23 b	357,5 \pm 62 b	488,4 \pm 46 a
Grüngutkompost	405,0 \pm 48 ab	523,3 \pm 65 a	669,2 \pm 23 a	625,3 \pm 57 a
Pferdemist	483,8 \pm 54 a	415,4 \pm 10 ab	490,8 \pm 57 ab	553,8 \pm 67 a
Gehölzhäcksel	485,0 \pm 71 a	459,2 \pm 47 ab	542,5 \pm 56 ab	602,1 \pm 44 a
Mittelwert \pm Standardfehler, Tukey-Test zweifaktorielle Auswertung Düngung \times Jahr ↓, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung \times Termin				
Termin	A	A	A	A

Tab. A 10: Bodenatmung bei Ackerbohne zu 5 Terminen im Jahr 2010 [$\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$]

Prüfglieder	Messdatum				
	07.04.2010	06.06.2010	13.06.2010	06.07.2010	21.07.2010
Kontrolle	187,0 ±77 c	1104,4 ±182 a	842,6 ±108 a	833,5 ±127 b	424,1 ±54 a
Kalk	251,8 ±37 bc	1169,7 ±197 a	869,0 ±134 a	921,4 ±96 ab	620,4 ±53 a
Mineral	163,8 ±26 c	947,9 ±69 a	686,5 ±100 a	812,4 ±87 b	495,0 ±91 a
Grüngutkompost	477,1 ±119 ab	1693,0 ±257 a	803,3 ±42 a	1214,6 ±127 a	570,4 ±84 a
Pferdemist	576,5 ±32 a	1688,1 ±72 a	981,7 ±170 a	1175,9 ±92 ab	694,5 ±52 a
Gehölzhäcksel	394,5 ±38 abc	1003,4 ±66 a	769,3 ±62 a	1116,0 ±192 ab	688,8 ±85 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test					
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, keine signifikanten Wechselwirkungen Düngung × Termin					
Termin	C	A	ABC	AB	BC

Tab. A 11: N_{\min} -Vorrat im Boden zu Saatplatterbse und nachfolgendem Winterweizen in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008/2009 und 2009/2010 (P -Werte aus F-Test)

Zeitpunkt	Tiefe	Prüfglieder						P -Wert
2008/2009		Kontrolle	Kalk	Mineral	Grüngut-kompost	Pferdemist	Stroh	
N_{\min} Ernte Erbse [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	20,6 ±1,8	17,6 ±3,4	25,9 ± 2,4	17,8 ±2,4	25,7 ±4,7	18,1 ±1,6	0,2751
	30-60 cm	9,9 ±1,6	8,8 ±1,6	10,0 ± 1,5	10,3 ±0,4	11,2 ±2,0	13,3 ±2,3	0,6008
N_{\min} Frühjahr Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	-	-	-	-	-	-	-
	30-60 cm	-	-	-	-	-	-	-
N_{\min} Ernte Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	7,9 ±1,9	6,9 ±0,5	6,7 ± 1,2	6,5 ±1,7	10,8 ±2,4	9,9 ±2,0	0,3099
	30-60 cm	4,0 ±0,5	4,2 ±0,4	4,1 ± 0,8	5,4 ±1,2	4,5 ±1,0	5,1 ±1,2	0,8258
2009/2010								
N_{\min} Ernte Erbse [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	7,1 ±3,5	6,1 ±3,1	9,6 ±1,9	10,8 ±2,6	16,9 ±5,8	13,2 ±6,2	0,5049
	30-60 cm	7,9 ±2,8	6,9 ±0,6	10,5 ±1,7	10,3 ±2,8	11,9 ±1,3	4,1 ±1,5	0,0863
N_{\min} Frühjahr Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	12,2 ±0,6	11,9 ±2,7	12,2 ±2,2	14,7 ±1,4	14,0 ±2,0	10,5 ±2,1	0,6101
	30-60 cm	9,5 ±2,1	11,2 ±1,2	11,0 ±1,3	10,2 ±0,5	17,2 ±2,6	10,1 ±2,4	0,0589
N_{\min} Ernte Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	11,6 ±1,2	9,4 ±1,2	10,0 ±1,9	8,2 ±0,9	13,8 ±2,1	11,1 ±2,0	0,2190
	30-60 cm	7,5 ±0,8	6,0 ±1,0	3,1 ±0,7	5,1 ±1,3	6,6 ±2,6	8,0 ±1,7	0,3350

Tab. A 12: Gehalte an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium im Spross der Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 und 2009

Prüfglieder	Nährstoffe							
	Stickstoff [g kg ⁻¹ TM]		Phosphor [g kg ⁻¹ TM]		Kalium [g kg ⁻¹ TM]		Magnesium [g kg ⁻¹ TM]	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Kontrolle	35,3 ±0,86 a	28,1 ±0,19 c	2,9 ±0,09 a	2,6 ±0,05 b	26,0 ±1,34 a	16,6 ±0,37 d	1,7 ±0,07 a	1,6 ±0,03 a
Kalk	35,6 ±0,28 a	27,7 ±0,25 c	3,0 ±0,13 a	2,6 ±0,05 b	28,3 ±0,86 a	16,6 ±0,50 d	1,6 ±0,07 a	1,6 ±0,05 a
Mineral	33,8 ±0,95 a	29,3 ±0,35 c	2,8 ±0,09 a	2,7 ±0,06 b	28,2 ±0,86 a	18,0 ±0,44 cd	1,7 ±0,06 a	1,6 ±0,06 a
Grüngutkompost	35,1 ±1,08 a	27,8 ±0,30 c	3,0 ±0,25 a	2,8 ±0,11 ab	28,2 ±1,48 a	20,3 ±0,54 bc	1,7 ±0,09 a	1,6 ±0,10 a
Pferdemist	34,0 ±0,53 a	31,2 ±0,38 b	3,0 ±0,05 a	3,0 ±0,03 a	30,9 ±0,96 a	24,4 ±0,92 a	1,6 ±0,10 a	1,5 ±0,03 a
Stroh	34,6 ±0,98 a	33,7 ±0,48 a	3,3 ±0,15 a	3,0 ±0,03 a	29,7 ±1,55 a	21,9 ±1,03 ab	1,8 ±0,05 a	1,6 ±0,05 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^S Scheffè-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	A	A	B	A	A
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0001 ^S		0,4251 ^S		0,1235 ^S		0,7267 ^S	

Tab. A 13: Gehalte an Schwefel, Molybdän und Bor im Spross der Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 und 2009

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Schwefel [g kg ⁻¹ TM]		Molybdän [mg kg ⁻¹ TM]		Bor [mg kg ⁻¹ TM]	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Kontrolle	2,0 ±0,10 b	1,6 ±0,03 c	2,8 ±0,63 a	2,7 ±0,17 b	22,2 ±0,45 a	15,5 ±0,20 ab
Kalk	2,1 ±0,09 ab	1,6 ±0,05 c	3,3 ±0,24 a	3,6 ±0,20 b	23,5 ±0,42 a	15,0 ±0,29 b
Mineral	2,6 ±0,03 a	2,8 ±0,15 a	3,3 ±0,68 a	3,5 ±0,63 b	21,8 ±0,64 a	15,1 ±0,44 ab
Grüngutkompost	2,1 ±0,12 ab	1,8 ±0,10 bc	4,4 ±0,74 a	7,2 ±0,69 a	22,6 ±1,30 a	16,7 ±0,83 ab
Pferdemist	2,2 ±0,04 ab	2,2 ±0,06 b	3,2 ±0,23 a	6,8 ±1,06 a	22,5 ±1,30 a	15,6 ±0,36 ab
Stroh	2,2 ±0,13 ab	2,1 ±0,08 b	2,5 ±0,22 a	2,8 ±0,49 b	23,9 ±0,25 a	17,0 ±0,28 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^s Scheffè-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	B	A	A	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0017 ^s		0,6344 ^s		0,4397 ^s	

Tab. A 14: Entzug von Phosphor, Kalium und Magnesium durch Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 und 2009

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Phosphor [kg ha ⁻¹]		Kalium [kg ha ⁻¹]		Magnesium [kg ha ⁻¹]	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Kontrolle	16,1 ±0,9 a	12,0 ±0,8 a	146,6 ±10,1 a	75,9 ±7,8 b	9,6 ±0,6 a	6,3 ±0,4 a
Kalk	17,9 ±1,5 a	12,6 ±0,3 a	169,1 ±17,7 a	75,5 ±6,4 b	9,5 ±1,0 a	7,1 ±0,3 a
Mineral	15,1 ±0,6 a	14,0 ±0,9 a	152,0 ±6,1 a	76,9 ±4,2 b	9,0 ±0,7 a	7,3 ±0,5 a
Grüngutkompost	16,8 ±1,3 a	11,3 ±0,2 a	163,9 ±14,7 a	91,1 ±1,0 ab	9,6 ±0,7 a	7,0 ±0,4 a
Pferdemist	16,6 ±2,1 a	11,6 ±0,5 a	174,7 ±23,5 a	115,9 ±8,8 a	9,1 ±1,5 a	7,0 ±0,4 a
Stroh	16,7 ±1,1 a	11,9 ±0,8 a	151,8 ±8,4 a	89,6 ±8,8 ab	9,2 ±0,3 a	7,1 ±0,7 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^S Scheffè-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	B	A	B	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,6639 ^S		0,7218 ^S		0,9906 ^S	

Tab. A 15: Entzug von Schwefel, Molybdän und Bor durch Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 und 2009

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Schwefel [kg ha ⁻¹]		Molybdän [g ha ⁻¹]		Bor [g ha ⁻¹]	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Kontrolle	11,0 ±0,8 a	7,1 ±0,7 c	15,1 ±2,9 a	12,2 ±1,2 b	125,0 ±4,2 a	70,1 ±5,2 a
Kalk	12,5 ±1,2 a	7,3 ±0,4 c	20,0 ±2,8 a	16,4 ±0,8 b	140,3 ±16,0 a	68,1 ±3,3 a
Mineral	13,8 ±0,7 a	12,1 ±0,9 a	17,3 ±2,5 a	14,6 ±2,6 b	117,2 ±5,0 a	64,4 ±3,0 a
Grüngutkompost	12,2 ±1,2 a	8,0 ±0,3 bc	25,0 ±5,1 a	32,2 ±2,4 a	130,1 ±12,2 a	74,9 ±2,2 a
Pferdemist	12,3 ±1,3 a	10,2 ±0,6 ab	17,9 ±1,9 a	32,5 ±5,7 a	126,0 ±13,6 a	74,3 ±5,5 a
Stroh	11,0 ±0,4 a	8,6 ±0,6 c	13,0 ±1,8 a	11,5 ±2,5 b	122,4 ±6,0 a	69,2 ±5,5 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^s Scheffè-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	B	A	A	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0861 ^s		0,0722 ^s		0,3155 ^s	

Tab. A 16: Feldaufgang und Spross-TM von Saatplatterbse und Welschem Weidelgras in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 und 2009

Prüfglieder	Feldaufgang Saatplatterbse [%]		Spross-TM Saatplatterbse [dt ha ⁻¹]		Spross-TM Welsches Weidelgras [dt ha ⁻¹]	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Kontrolle	73,5 ±5,58 a	72,8 ±6,42 a	56,4 ±2,0 a	45,5 ±3,9 a	25,0 ±3,4 a	14,0 ±2,0 b
Kalk	72,3 ±5,78 a	76,5 ±8,08 a	59,9 ±6,8 a	45,3 ±2,5 a	27,9 ±5,4 a	13,4 ±0,5 b
Mineral	80,8 ±6,55 a	77,0 ±5,95 a	54,1 ±2,9 a	42,8 ±1,4 a	27,3 ±6,5 a	16,5 ±5,1 ab
Grüngutkompost	77,0 ±9,48 a	80,3 ±7,20 a	58,1 ±6,3 a	45,0 ±1,3 a	27,2 ±8,2 a	14,1 ±0,6 b
Pferdemist	77,3 ±6,21 a	53,5 ±9,23 a	56,2 ±6,8 a	47,6 ±3,2 a	29,1 ±6,1 a	27,7 ±4,5 a
Stroh	34,8 ±6,42 b	45,0 ±7,71 a	47,7 ±4,1 a	40,7 ±3,1 a	26,9 ±2,4 a	21,0 ±2,7 ab
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^S Scheffè-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	A	A	B	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,2973		0,9552		0,9051 ^S	

Tab. A 17: Ertrag, Bestandesdichte und Tausendkornmasse von Winterweizen nach Saatplatterbse in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Korn-TM Winterweizen [dt ha ⁻¹]		Stroh-TM Winterweizen [dt ha ⁻¹]		Bestandesdichte [Ähren m ⁻²]		Tausendkornmasse [g]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	17,4 ±1,3 a	15,8 ±1,5 a	23,0 ±3,5 a	22,3±3,8 a	418±2 a	392 ±4 a	36,0±1,9 a	44,0 ±0,4 a
Kalk	18,7 ±1,3 a	19,0 ±1,7 a	21,9 ±2,1 a	29,7±4,1 a	343±4 a	436 ±2 a	36,5 ±0,4 a	43,5 ±0,7 a
Mineral	19,7 ±0,6 a	20,9 ±1,7 a	21,6 ±0,5 a	23,3±1,2 a	378±2 a	394 ±2 a	36,0 ±0,5 a	43,8 ±0,4 a
Grüngutkompost	16,1±1,3 a	17,1±0,9 a	27,0 ±4,9 a	21,4±1,9 a	444±2 a	349 ±5 a	37,6 ±0,5 a	45,3 ±1,8 a
Pferdemist	20,7±1,9 a	20,7 ±2,2 a	23,8 ±2,2 a	23,9 ±2,9 a	404±3 a	388 ±2 a	37,3 ±0,7 a	44,0 ±0,4 a
Stroh	13,6±1,5 a	15,4±2,3 a	27,6±7,9 a	29,0 ±7,9 a	417±6 a	443 ±4 a	35,7 ±1,1 a	43,5±0,8 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^S Scheffè-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	A	A	A	A	A	B	A
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,8903 ^S		0,7336		0,1351		0,9840	

Tab. A 18: Rohprotein- und N-Gehalt sowie N-Entzug von Winterweizen nach Saatplatterbse in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Rohprotein Korn [%]		N-Gehalt Stroh [%]		N-Entzug Korn [kg ha ⁻¹]		N-Entzug Stroh [kg ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	11,0 ±0,2 a	9,3 ±0,2 b	0,56 ±0,01 a	0,27 ±0,02 a	33,6 ±2,7 ab	23,9 ±2,7 a	12,8 ±1,9 a	5,8 ±0,5 a
Kalk	11,0 ±0,1 a	9,1 ±0,2 b	0,54 ±0,03 a	0,27 ±0,03 a	36,0 ±2,3 ab	27,6 ±2,3 a	11,9 ±1,5 a	8,5 ±2,4 a
Mineral	11,0 ±0,2 a	9,2 ±0,2 b	0,55 ±0,02 a	0,29 ±0,04 a	36,6 ±1,6 ab	30,8 ±2,6 a	11,8 ±0,7 a	6,7 ±0,7 a
Grüngutkompost	10,6 ±0,2 a	9,4 ±0,2 b	0,51 ±0,02 a	0,27 ±0,03 a	30,0 ±2,5 ab	25,8 ±1,7 a	13,7 ±2,5 a	5,8 ±0,9 a
Pferdemist	11,3 ±0,3 a	10,2 ±0,1 a	0,58 ±0,02 a	0,33 ±0,04 a	40,8 ±2,8 a	27,6 ±3,0 a	13,5 ±1,0 a	7,8 ±1,0 a
Stroh	10,8 ±0,3 a	9,2 ±0,2 b	0,49 ±0,01 a	0,26 ±0,03 a	25,7 ±2,5 b	22,7 ±3,4 a	13,4 ±3,8 a	7,2 ±1,5 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	B	A	B	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,2990		0,8420		0,7262		0,8429	

Tab. A 19: Spross-N der Saatplatterbse und des Welschen Weidelgrases sowie Entzug von Stickstoff aus dem Boden und symbiotische N₂-Fixierung der Saatplatterbse in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2008 und 2009

Prüfglieder	Spross-N Saatplatterbse [kg ha ⁻¹ N]		Spross-N Weidelgras [kg ha ⁻¹ N]		N _{Boden} Saatplatterbse [kg ha ⁻¹ N]		N _{fix} Saatplatterbse ^{ED} [kg ha ⁻¹ N]	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Kontrolle	199,4 ±10 a	127,5 ±11 a	53,3 ±11 a	28,8 ±4 b	53,3 ±11 a	28,8 ±4 b	147,5 ±7 a	104,1 ±12 a
Kalk	213,4 ±25 a	125,4 ±8 a	58,5 ±17 a	28,3 ±2 b	58,5 ±17 a	28,3 ±2 b	155,7 ±21 a	99,9 ±7 a
Mineral	183,4 ±14 a	125,2 ±4 a	52,9 ±15 a	32,8 ±10 b	52,9 ±15 a	32,8 ±10 b	132,5 ±13 a	96,5 ±7 a
Grüngutkompost	202,3 ±18 a	125,2 ±4 a	54,4 ±17 a	29,5 ±1 b	54,4 ±17 a	29,5 ±1 b	149,4 ±15 a	99,8 ±4 a
Pferdemist	190,7 ±23 a	148,6 ±10 a	59,1 ±12 a	59,7 ±6 a	59,1 ±12 a	59,7 ±6 a	133,2 ±28 a	94,1 ±7 a
Stroh	164,9 ±13 a	136,8 ±9 a	51,0 ±6 a	43,0 ±6 ab	51,0 ±6 a	43,0 ±6 ab	115,6 ±16 a	101,4 ±10 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^{ED} einfache Differenzmethode								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	A	A	A	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,3022		0,5788		0,5905		0,7512	

Tab. A 20: Rohproteingehalt im Korn von Winterweizen nach Vorfrucht Saatplatterbse in den Jahren 2009 und 2010 sowie nach Vorfrucht Ackerbohne und Rotklee in den Jahren 2010 und 2011

Prüfglieder	Rohproteingehalt [%]					
	Vorfrucht Saatplatterbse		Vorfrucht Ackerbohne		Vorfrucht Rotklee	
	2009	2010	2010	2011	2010	2011
Kontrolle	11,0 ±0,2 a	9,3 ±0,2 b	9,9 ±0,2 a	8,1 ±0,2 a	10,3 ±0,2 a	8,2 ±0,2 a
Kalk	11,0 ±0,2 a	9,1 ±0,2 b	10,0 ±0,2 a	8,0 ±0,1 a	10,6 ±0,2 a	8,5 ±0,2 a
Mineral	11,0 ±0,2 a	9,2 ±0,2 b	9,9 ±0,1 a	8,0 ±0,1 a	10,8 ±0,2 a	8,1 ±0,2 a
Grüngutkompost	10,6 ±0,1 a	9,4 ±0,1 b	10,4 ±0,2 a	8,2 ±0,1 a	10,7 ±0,1 a	8,4 ±0,1 a
Pferdemist	11,3 ±0,1 a	10,2 ±0,1 a	10,1 ±0,3 a	8,0 ±0,2 a	10,7 ±0,3 a	8,4 ±0,2 a
Stroh ¹ / Gehölzhäcksel ²	10,8 ±0,2 a ¹	9,2 ±0,2 b ¹	9,8 ±0,2 a ²	8,2 ±0,1 a ²	10,3 ±0,2 a ²	8,1 ±0,1 a ²
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	B	A	B	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,2990		0,6058		0,5358	

Tab. A 21: N_{min}-Vorräte im Boden zu Ackerbohne im Jahr 2009 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2010

Zeitpunkt	Tiefe	Prüfglieder					
		Kontrolle	Kalk	Mineral	Grüngut- kompost	Pferdemist	Gehölzhäcksel
N _{min} Saat Ackerbohne [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	9,2					
	30-60 cm	10,1					
N _{min} + 38 d Ackerbohne [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	20,1 ± 4,2 a	11,4 ± 1,2 ab	11,4 ± 1,2 ab	20,1 ± 2,3 a	15,2 ± 1,8 ab	9,0 ± 1,2 b
	30-60 cm	-	-	-	-	-	-
N _{min} Ernte Ackerbohne [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	9,2 ± 2,5 a	7,3 ± 4,1 a	4,8 ± 0,3 a	20,6 ± 9,9 a	11,9 ± 2,0 a	6,9 ± 2,8 a
	30-60 cm	9,2 ± 3,8 a	13,3 ± 1,5 a	10,8 ± 1,8 a	15,3 ± 0,8 a	11,4 ± 2,7 a	13,3 ± 2,3 a
N _{min} Frühjahr Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	10,0 ± 2,0 a	8,8 ± 1,0 a	13,2 ± 2,7 a	14,3 ± 1,6 a	13,8 ± 1,2 a	13,6 ± 1,6 a
	30-60 cm	10,0 ± 1,8 b	9,9 ± 0,8 b	11,6 ± 1,1 b	17,2 ± 2,2 a	11,9 ± 1,8 ab	8,5 ± 0,5 b
N _{min} Ernte Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	7,2 ± 1,0 a	8,4 ± 1,2 a	9,0 ± 2,8 a	8,3 ± 2,2 a	9,3 ± 2,0 a	8,4 ± 1,5 a
	30-60 cm	4,6 ± 1,3 a	3,2 ± 1,3 a	2,1 ± 0,8 a	3,3 ± 1,7 a	3,2 ± 2,3 a	3,1 ± 1,7 a

Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, → Leserichtung

Tab. A 22: N_{min}-Vorräte im Boden zu Ackerbohne im Jahr 2010 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2011

Zeitpunkt	Tiefe	Prüfglieder					
		Kontrolle	Kalk	Mineral	Grüngut-kompost	Pferdemist	Gehölzhäcksel
N _{min} Saat Ackerbohne [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	10,6					
	30-60 cm	11,2					
N _{min} + 42 d Ackerbohne [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	8,5 ± 2,1 ab	16,1 ± 4,5 ab	15,2 ± 2,8 ab	27,5 ± 7,5 a	11,6 ± 4,2 ab	3,9 ± 2,3 b
	30-60 cm	8,2 ± 1,6 a	10,2 ± 1,7 a	8,9 ± 0,8 a	9,5 ± 2,6 a	8,4 ± 1,0 a	6,6 ± 1,0 a
N _{min} Ernte Ackerbohne [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	5,0 ± 0,7 b	5,8 ± 1,5 b	5,5 ± 1,1 b	8,7 ± 1,5 ab	11,2 ± 1,2 a	5,6 ± 1,2 b
	30-60 cm	4,3 ± 0,2 a	4,3 ± 1,5 a	5,5 ± 1,3 a	9,4 ± 4,4 a	7,7 ± 1,9 a	8,0 ± 0,6 a
N _{min} Frühjahr Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	11,1 ± 1,3 a	10,5 ± 1,5 a	10,7 ± 0,5 a	10,0 ± 1,0 a	9,4 ± 0,7 a	12,0 ± 1,4 a
	30-60 cm	11,3 ± 0,5 a	8,3 ± 1,6 a	8,8 ± 1,5 a	9,6 ± 2,1 a	8,4 ± 0,4 a	9,6 ± 0,4 a
N _{min} Ernte Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	5,9 ± 0,6 a	7,8 ± 1,4 a	6,0 ± 1,1 a	6,8 ± 1,1 a	10,4 ± 1,8 a	7,8 ± 1,9 a
	30-60 cm	4,0 ± 0,4 a	4,3 ± 0,4 a	3,6 ± 0,5 a	5,7 ± 1,2 a	4,5 ± 0,5 a	4,7 ± 0,8 a

Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, → Leserichtung

Tab. A 23: N_{min}-Mengen im Boden zu Rotklee im Jahr 2009 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2010

Zeitpunkt	Tiefe	Prüfglieder					
		Kontrolle	Kalk	Mineral	Grüngut- kompost	Pferdemist	Gehölzhäcksel
N _{min} Saat Rotklee [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	10,6					
	30-60 cm	11,2					
N _{min} + 38 d Rotklee [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	14,6 ± 1,2 ab	10,4 ± 1,5 b	13,3 ± 1,2 ab	21,5 ± 3,4 a	14,1 ± 2,0 ab	7,2 ± 1,7 b
	30-60 cm	-	-	-	-	-	-
N _{min} Ernte Rotklee [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	11,7 ± 3,4 a	8,8 ± 1,5 a	10,1 ± 0,7 a	20,2 ± 10,0 a	10,6 ± 2,0 a	9,3 ± 1,7 a
	30-60 cm	11,2 ± 2,5 a	8,5 ± 0,4 a	8,7 ± 0,9 a	9,8 ± 1,7 a	9,4 ± 1,8 a	6,9 ± 1,2 a
N _{min} Frühjahr Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	14,5 ± 1,9 a	13,4 ± 3,2 a	16,9 ± 3,3 a	13,3 ± 1,6 a	17,6 ± 2,2 a	12,4 ± 1,1 a
	30-60 cm	11,7 ± 1,6 a	12,7 ± 1,2 a	10,1 ± 3,5 a	12,1 ± 1,2 a	16,7 ± 0,9 a	10,4 ± 1,2 a
N _{min} Ernte Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	10,2 ± 2,5 a	8,3 ± 0,5 a	10,5 ± 1,5 a	6,4 ± 1,1 a	9,9 ± 3,9 a	8,3 ± 2,3 a
	30-60 cm	1,9 ± 0,9 a	4,1 ± 1,3 a	5,7 ± 3,2 a	6,9 ± 1,1 a	4,7 ± 1,7 a	3,8 ± 1,1 a

Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, → Leserichtung

Tab. A 24: N_{min}-Mengen im Boden zu Rotklee im Jahr 2010 und nachfolgendem Winterweizen im Jahr 2011

Zeitpunkt	Tiefe	Prüfglieder					
		Kontrolle	Kalk	Mineral	Grüngut- kompost	Pferdemist	Gehölzhäcksel
N _{min} Saat Rotklee [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	10,6					
	30-60 cm	11,2					
N _{min} + 42 d Rotklee [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	12,7 ± 1,9 ab	13,3 ± 0,8 ab	10,5 ± 1,3 ab	16,6 ± 1,2 a	9,8 ± 2,7 ab	5,7 ± 1,3 b
	30-60 cm	7,8 ± 2,5 a	9,8 ± 1,7 a	6,6 ± 1,6 a	12,1 ± 1,4 a	7,1 ± 0,9 a	9,3 ± 1,3 a
N _{min} Ernte Rotklee [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	2,4 ± 0,9 a	5,4 ± 2,4 a	3,6 ± 1,4 a	6,2 ± 1,4 a	6,6 ± 1,5 a	4,6 ± 0,5 a
	30-60 cm	4,6 ± 0,6 a	5,2 ± 1,9 a	3,3 ± 1,6 a	4,7 ± 1,8 a	5,1 ± 1,2 a	2,9 ± 0,9 a
N _{min} Frühjahr Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	10,4 ± 0,7 a	10,0 ± 2,0 a	7,3 ± 1,3 a	5,6 ± 0,6 a	5,4 ± 1,5 a	6,3 ± 0,7 a
	30-60 cm	7,5 ± 1,1 a	7,5 ± 1,0 a	7,0 ± 2,1 a	5,5 ± 0,7 a	3,7 ± 0,5 a	6,3 ± 0,7 a
N _{min} Ernte Winterweizen [kg ha ⁻¹ N]	0-30 cm	5,8 ± 0,6 a	8,3 ± 0,9 a	7,7 ± 1,4 a	8,4 ± 1,0 a	9,8 ± 1,3 a	7,0 ± 0,5 a
	30-60 cm	3,5 ± 0,5 a	5,2 ± 0,4 a	3,7 ± 0,5 a	4,3 ± 0,4 a	5,6 ± 0,6 a	3,7 ± 0,4 a

Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, → Leserichtung

Tab. A 25: Gehalte an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium im Blatt von Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe							
	Stickstoff [g kg ⁻¹ TM]		Phosphor [g kg ⁻¹ TM]		Kalium [g kg ⁻¹ TM]		Magnesium [g kg ⁻¹ TM]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	45,1 ±1,0 ab	37,5 ±1,4 a	3,8 ±0,11 ab	2,4 ±0,04 a	18,0 ±0,48 b	19,1 ±2,19 b	3,4 ±0,1 ab	3,2 ±0,1 a
Kalk	41,0 ±2,4 b	38,9 ±0,1 a	3,7 ±0,11 ab	1,6 ±0,21 b	17,5 ±2,00 b	22,7 ±5,88 ab	3,2 ±0,4 ab	3,3 ±0,2 a
Mineral	45,5 ±0,9 ab	38,5 ±0,3 a	3,5 ±0,05 b	1,7 ±0,29 b	24,4 ±0,74 a	25,1 ±2,39 ab	3,6 ±0,2 a	2,8 ±0,1 a
Grüngutkompost	47,6 ±0,8 a	35,4 ±0,8 a	4,0 ±0,04 a	2,5 ±0,07 a	23,8 ±1,65 a	34,0 ±2,31 a	2,9 ±0,2 ab	2,7 ±0,2 a
Pferdemist	48,7 ±2,3 a	37,5 ±1,7 a	3,9 ±0,11 a	2,6 ±0,09 a	21,1 ±1,37 ab	31,5 ±0,72 ab	2,8 ±0,2 b	3,0 ±0,1 a
Gehölzhäcksel	47,1 ±0,4 a	36,1 ±0,9 a	4,0 ±0,07 a	2,0 ±0,24 ab	21,1 ±0,53 ab	24,2 ±1,28 ab	3,0 ±0,1 ab	3,1 ±0,1 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	B	B	A	A	A
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0013		0,0102		0,1503		0,0724	

Tab. A 26: Gehalte an Schwefel, Molybdän und Bor im Blatt von Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Schwefel [g kg ⁻¹ TM]		Molybdän [mg kg ⁻¹ TM]		Bor [mg kg ⁻¹ TM]	
	2009	2010	2009 *	2010	2009 *	2010
Kontrolle	2,6 ±0,10 c	1,9 ±0,06 b	1,21	0,34 ±0,01 bc	18,9	17,7 ±0,42 a
Kalk	2,5 ±0,05 c	2,1 ±0,03 b	0,52	0,40 ±0,01 ab	13,2	17,5 ±0,73 a
Mineral	4,1 ±0,15 a	3,0 ±0,11 a	< 0,25	0,25 ±0,01 c	15,9	15,8 ±0,53 ab
Grüngutkompost	3,3 ±0,06 b	2,0 ±0,06 b	0,76	0,49 ±0,04 a	13,9	15,9 ±0,17 ab
Pferdemist	3,3 ±0,13 b	2,2 ±0,19 b	< 0,25	0,39 ±0,04 abc	15,9	15,5 ±0,50 b
Gehölzhäcksel	2,8 ±0,11 c	2,0 ±0,04 b	0,46	0,33 ±0,03 bc	21,2	16,9 ±0,10 ab
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, * Analyse nur in einer Wiederholung						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	B	-	-	-	-
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0016		-		-	

Tab. A 27: Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kaliumim Schnittgut des Rotklees (1. Schnitt)
in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Stickstoff [g kg ⁻¹ TM]		Phosphor [g kg ⁻¹ TM]		Kalium [g kg ⁻¹ TM]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	28,7 ±1,3 a	26,3 ±0,8 a	2,7 ±0,15 a	2,2 ±0,04 bc	31,6 ±1,91 c	28,6 ±1,16 d
Kalk	30,5 ±2,5 a	27,0 ±1,4 a	2,7 ±0,10 a	2,3 ±0,06 b	33,2 ±0,72 bc	28,2 ±2,08 d
Mineral	28,8 ±1,9 a	28,7 ±0,8 a	2,8 ±0,04 a	2,3 ±0,07 b	41,8 ±1,59 a	36,6 ±2,41 bc
Grüngutkompost	28,2 ±0,8 a	26,7 ±0,8 a	2,9 ±0,03 a	2,6 ±0,11 a	38,9 ±0,71 abc	43,8 ±1,91 a
Pferdemist	27,6 ±0,4 a	28,5 ±1,6 a	3,0 ±0,04 a	2,4 ±0,05 ab	40,5 ±2,21 ab	38,2 ±0,64 ab
Gehölzhäcksel	25,6 ±1,4 a	25,2 ±0,5 a	2,8 ±0,01 a	2,0 ±0,06 c	35,4 ±2,67 abc	30,8 ±1,58 cd
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	A	A	B	A	A
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,4733		0,0354		0,0537	

Tab. A 28: Gehalte an Molybdän und Bor im Spross Schnittgut des Rotklees (1. Schnitt)
in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe			
	Molybdän [mg kg ⁻¹ TM]		Bor [mg kg ⁻¹ TM]	
	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	2,3 ±0,10 a	1,7 ±0,04 b	29,1 ±1,51 a	27,2 ±1,50 a
Kalk	2,1 ±0,25 ab	2,0 ±0,30 ab	29,7 ±1,45 a	26,5 ±1,79 a
Mineral	0,6 ±0,11 c	0,2 ±0,05 c	27,2 ±1,66 a	25,1 ±2,55 a
Grüngutkompost	2,2 ±0,25 a	3,2 ±0,50 a	25,6 ±0,52 a	25,0 ±0,50 a
Pferdemist	1,3 ±0,20 bc	1,3 ±0,17 bc	26,9 ±1,08 a	23,9 ±1,06 a
Gehölzhäcksel	1,8 ±0,33 ab	1,2 ±0,16 bc	26,6 ±1,22 a	24,9 ±1,07 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^s Scheffe-Test				
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, P-Werte aus F-Test				
Jahr	A	A	A	A
P-Wert Düngung × Jahr	0,0947 ^s		0,9500	

Tab. A 29: Entzug von Stickstoff, Phosphor und Kalium mit dem Schnittgut des Rotklees (1. Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Stickstoff [kg ha ⁻¹]		Phosphor [kg ha ⁻¹]		Kalium [kg ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	112,5 ±5,7 a	73,0 ±5,6 b	10,8 ±1,1 b	6,1 ±0,6 b	124,3 ±9,9 c	79,5 ±7,4 b
Kalk	139,6 ±11,9 a	74,0 ±11,1 b	12,5 ±0,7 ab	6,3 ±0,8 b	151,6 ±6,0 bc	76,8 ±10,3 b
Mineral	132,8 ±5,5 a	87,0 ±5,4 ab	13,0 ±0,3 ab	7,0 ±0,6 b	194,2 ±11,4 ab	110,0 ±3,2 b
Grüngutkompost	133,5 ±12,1 a	104,6 ±4,7 a	13,5 ±1,3 ab	10,2 ±0,3 a	184,6 ±16,2 ab	171,1 ±5,4 a
Pferdemist	144,4 ±3,5 a	80,9 ±5,2 ab	15,7 ±0,6 a	6,8 ±0,7 b	231,8 ±18,8 a	109,4 ±9,3 b
Gehölzhäcksel	129,6 ±14,2 a	65,1 ±5,0 b	13,9 ±1,3 ab	5,1 ±0,3 b	175,4 ±15,8 abc	79,3 ±5,0 b
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^t transformiert						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	B	A	B	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0228 ^t		0,0034		0,0016 ^t	

Tab. A 30: Entzug von Molybdän und Bor mit dem Schnittgut des Rotklees (1. Schnitt)
in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe			
	Molybdän [g ha ⁻¹]		Bor [g ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	8,8 ±0,6 ab	4,5 ±0,9 b	116,0 ±14,1 a	76,8 ±11,2 a
Kalk	9,7 ±1,1 ab	5,3 ±2,6 b	136,0 ±10,0 a	73,5 ±13,0 a
Mineral	2,9 ±0,5 b	0,7 ±0,4 b	125,6 ±5,3 a	77,3 ±12,5 a
Grüngutkompost	10,8 ±2,1 a	12,3 ±1,8 a	121,5 ±11,1 a	97,7 ±0,8 a
Pferdemist	6,9 ±1,2 ab	3,9 ±0,7 b	140,4 ±3,3 a	67,7 ±4,1 a
Gehölzhäcksel	9,0 ±2,1 ab	3,2 ±0,5 b	133,3 ±15,9 a	64,3 ±5,9 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^s Scheffè-Test, ^t transformiert				
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test				
Jahr	A	B	A	B
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0990 ^t		0,0853 ^t	

Tab. A 31: Gehalte an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium im Spross von Rotklee (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe							
	Stickstoff [g kg ⁻¹ TM]		Phosphor [g kg ⁻¹ TM]		Kalium [g kg ⁻¹ TM]		Magnesium [g kg ⁻¹ TM]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	27,6 ±0,16 ab	27,5 ±0,50 a	2,6 ±0,03 a	2,6 ±0,04 a	30,6 ±1,2 a	30,3 ±0,9 c	2,9 ±0,1 ab	2,8 ±0,2 a
Kalk	28,3 ±0,23 ab	28,2 ±0,76 a	2,6 ±0,06 a	2,7 ±0,05 a	30,3 ±0,5 a	31,2 ±1,7 bc	3,0 ±0,1 a	2,8 ±0,1 a
Mineral	30,5 ±0,85 a	29,4 ±0,94 a	2,7 ±0,05 a	2,6 ±0,04 a	36,6 ±1,1 a	35,4 ±2,3 abc	2,8 ±0,1 ab	2,7 ±0,04 a
Grüngutkompost	27,3 ±0,71 ab	26,8 ±0,24 a	2,1 ±0,30 a	2,7 ±0,08 a	28,5 ±3,3 a	39,4 ±1,1 a	1,9 ±0,4 b	2,5 ±0,1 a
Pferdemist	28,7 ±0,78 ab	28,0 ±0,38 a	2,5 ±0,28 a	2,7 ±0,06 a	34,2 ±2,9 a	36,4 ±0,8 ab	2,3 ±0,3 ab	2,7 ±0,1 a
Gehölzhäcksel	26,7 ±1,01 b	27,3 ±0,49 a	2,6 ±0,03 a	2,5 ±0,10 a	32,0 ±1,6 a	31,6 ±0,4 bc	2,8 ±0,1 ab	2,8 ±0,1 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	A	A	A	A	A	A	A
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,8734		0,0685		0,0147		0,1568	

Tab. A 32: Gehalte an Schwefel, Molybdän und Bor im Spross von Rotklee (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Schwefel [g kg ⁻¹ TM]		Molybdän [mg kg ⁻¹ TM]		Bor [mg kg ⁻¹ TM]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	1,0 ±0,03 b	1,3 ±0,12 a	3,1 ±0,18 ab	2,7 ±0,33 a	27,7 ±1,80 a	29,0 ±0,43 a
Kalk	1,0 ±0,04 b	1,4 ±0,10 a	2,9 ±0,42 ab	3,1 ±0,08 a	28,9 ±1,82 a	29,1 ±1,22 a
Mineral	1,2 ±0,05 a	1,6 ±0,14 a	1,7 ±0,17 b	1,6 ±0,14 b	27,0 ±0,90 a	26,7 ±1,23 a
Grüngutkompost	1,0 ±0,00 b	1,5 ±0,29 a	3,6 ±0,39 a	3,4 ±0,17 a	26,4 ±1,05 a	26,6 ±0,46 a
Pferdemist	1,0 ±0,03 b	1,5 ±0,03 a	2,3 ±0,35 ab	2,6 ±0,22 a	25,5 ±1,51 a	27,8 ±0,57 a
Gehölzhäcksel	1,0 ±0,03 b	1,4 ±0,04 a	2,7 ±0,34 ab	2,5 ±0,28 a	27,6 ±0,95 a	28,9 ±0,37 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^S Scheffè-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	B	A	A	A	A	A
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,8042		0,3332		0,8380	

Tab. A 33: Entzug von Phosphor, Kalium und Magnesium mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Phosphor [kg ha ⁻¹]		Kalium [kg ha ⁻¹]		Magnesium [kg ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	29,1 ±0,7 a	24,3 ±1,4 ab	338,0 ±11,4 a	282,3 ±6,3 d	32,4 ±1,4 a	26,6 ±2,6 a
Kalk	30,1 ±0,6 a	25,8 ±1,3 ab	359,3 ±14,4 a	298,8 ±16,6 cd	35,0 ±1,9 a	26,5 ±1,9 a
Mineral	31,6 ±0,2 a	25,4 ±1,2 ab	436,6 ±20,2 a	343,1 ±8,9 bc	33,8 ±1,8 a	26,4 ±1,6 a
Grüngutkompost	25,1 ±2,8 a	29,8 ±0,9 a	337,5 ±30,2 a	430,7 ±14,9 a	22,4 ±4,1 a	27,0 ±1,1 a
Pferdemist	32,5 ±3,7 a	26,9 ±1,0 ab	442,3 ±46,8 a	358,2 ±10,4 b	29,1 ±4,5 a	26,9 ±0,9 a
Gehölzhäcksel	31,9 ±2,5 a	24,0 ±1,2 b	390,1 ±37,1 a	302,7 ±5,6 cd	33,4 ±3,0 a	26,4 ±1,3 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	B	A	B	A	B
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,0185		0,0018		0,1070	

Tab. A 34: Entzug von Schwefel, Molybdän und Bor mit dem Spross des Rotklees (3 Schnitte und Stoppel nach drittem Schnitt) in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Nährstoffe					
	Schwefel [kg ha ⁻¹]		Molybdän [g ha ⁻¹]		Bor [g ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	10,8 ±0,2 c	12,3 ±0,9 c	35,2 ±2,5 ab	25,2 ±3,2 ab	306,4 ±4,3 a	271,6 ±14,0 a
Kalk	11,8 ±0,4 bc	13,1 ±0,6 bc	34,2 ±5,3 ab	29,7 ±0,7 ab	341,0 ±16,5 a	279,4 ±15,9 a
Mineral	14,0 ±0,5 a	15,5 ±0,7 ab	20,6 ±2,6 b	15,2 ±1,5 c	321,3 ±6,8 a	261,6 ±23,0 a
Grüngutkompost	12,0 ±0,5 ab	15,8 ±0,3 a	43,0 ±4,6 a	36,6 ±1,9 a	315,2 ±10,6 a	291,0 ±7,2 a
Pferdemist	12,9 ±0,6 ab	15,0 ±0,3 ab	29,5 ±0,6 ab	25,3 ±2,5 bc	328,1 ±16,4 a	273,5 ±1,6 a
Gehölzhäcksel	11,9 ±1,2 bc	13,4 ±0,6 bc	32,7 ±4,1 ab	24,5 ±3,2 bc	335,5 ±28,0 a	276,7 ±5,7 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^s Scheffè-Test, ^t Daten transformiert						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	B	A	A	B	A	B
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,3376		0,3741 ^{s,t}		0,7850	

Tab. A 35: Mittelwerte und *P*-Werte der Einzeljahre von Feldaufgang, Bestandesdichte, Hülsendichte und TKM der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Feldaufgang Ackerbohne [%]		Bestandesdichte [Stängel m ⁻²]		Hülsendichte [Hülsen m ⁻²]		Tausendkornmasse [g]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	79,3 ±1,3 a	82,7 ±3,3 a	62 ±6 a	42 ±3 a	460 ±8 ab	284 ±11 a	461,2 ±11,9 a	-
Kalk	69,5 ±4,3 a	74,6 ±5,6 a	57 ±4 a	41 ±3 a	464 ±24 ab	287 ±95 a	479,9 ±12,3 a	424,5 ±7,0
Mineral	72,5 ±6,9 a	72,4 ±10,3 a	61 ±4 a	38 ±2 a	436 ±15 ab	267 ±21 a	394,7 ±49,0 a	403,9 ±9,3
Grüngutkompost	69,5 ±5,9 a	70,7 ±6,3 a	63 ±6 a	43 ±3 a	514 ±19 a	290 ±12 a	432,8 ±9,0 a	421,4 ±11,7
Pferdemist	54,3 ±9,9 a	82,7 ±6,4 a	47 ±3 a	35 ±3 a	426 ±24 b	267 ±9 a	429,0 ±19,0 a	413,7 ±9,4
Gehölzhäcksel	76,0 ±6,8 a	81,4 ±4,2 a	53 ±1 a	40 ±2 a	462 ±21 ab	274 ±15 a	464,3 ±19,9 a	-
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	A	A	B	A	B	-	-
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,2406		0,5689		0,4667		-	

Tab. A 36: Mittelwerte und *P*-Werte der Einzeljahre der Trockenmasse an Korn, Stroh und Unkraut der Ackerbohne und der Trockenmasse der Referenzkultur Spitzwegerich in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Korn Ackerbohne [dtha ⁻¹]		Stroh Ackerbohne ¹ [dtha ⁻¹]		Spitzwegerich [dtha ⁻¹]		Unkraut Ackerbohne [dtha ⁻¹]	
	2009	2010	2009 ^S	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	34,5 ±3,0 ab	28,7 ±1,3 a	40,5 ±3,8 a	25,8 ±1,5 a	72,2 ±4,8 b	48,2 ±4,9 a	18,7 ±3,1 ab	19,5 ±6,0 ab
Kalk	35,8 ±1,8 ab	29,0 ±2,3 a	42,3 ±2,0 a	23,9 ±3,8 a	74,3 ±5,2 ab	53,3 ±2,7 a	15,4 ±0,9 b	18,8 ±3,3 ab
Mineral	36,9 ±1,9 ab	26,2 ±1,9 a	51,9 ±4,1 a	22,8 ±0,6 a	79,9 ±5,1 ab	45,1 ±12,9 a	20,3 ±2,6 ab	22,8 ±5,0 ab
Grüngutkompost	36,5 ±2,6 ab	27,9 ±1,3 a	44,7 ±4,0 a	24,2 ±0,6 a	77,4 ±5,6 ab	51,3 ±7,2 a	15,3 ±0,6 b	30,6 ±3,3 ab
Pferdemist	30,2 ±1,9 b	28,4 ±1,4 a	42,0 ±4,7 a	21,4 ±2,3 a	93,2 ±6,4 a	53,5 ±2,4 a	28,0 ±4,6 a	46,3 ±16,7a
Gehölzhäcksel	42,5 ±2,1 a	28,2 ±1,4 a	51,6 ±6,6 a	21,0 ±0,9 a	77,2 ±4,2 ab	40,1 ±8,7 a	9,2 ±1,1 b	11,2 ±3,9 b
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, ^S Scheffè-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	B	A	B	A	A
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,0475		0,0871 ^S		0,4341		0,4937	

¹ Strohtrockenmasse Ackerbohne einschließlich Blattmasse

Tab. A 37: Feldaufgang und Spross-TM des Rotklee und der Referenzkultur Welsches Weidelgras in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Feldaufgang Rotklee [%]		Jahres-Sprossmasse Rotklee [dt ha ⁻¹ TM]		Welsches Weidelgras [dt ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	76,7 ±8,4 a	59,2 ±11,4 a	110,7 ±3,0 a	93,4 ±3,7 b	52,0 ±4,7 ab	71,4 ±4,1 ab
Kalk	74,6 ±1,7 a	66,9 ±9,8 a	118,4 ±3,3 a	96,1 ±3,1 b	52,9 ±3,0 ab	75,6 ±6,0 ab
Mineral	75,6 ±4,1 a	70,1 ±7,3 a	119,3 ±3,0 a	97,8 ±4,7 ab	47,1 ±3,1 b	61,0 ±3,2 b
Grüngutkompost	67,2 ±4,8 a	82,5 ±9,9 a	119,9 ±5,2 a	109,3 ±1,1 a	64,6 ±3,4 a	83,0 ±3,1 a
Pferdemist	73,0 ±2,8 a	45,8 ±4,6 a	129,2 ±5,0 a	98,5 ±1,5 ab	63,0 ±6,6 ab	87,1 ±4,5 a
Gehölzhäcksel	73,7 ±2,2 a	73,4 ±8,7 a	121,8 ±10,2 a	95,8 ±2,3 b	51,8 ±1,0 ab	69,1 ±5,5 ab
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test						
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test						
Jahr	A	A	A	B	B	A
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,0932		0,1770		0,8498	

Tab. A 38: Schnittgut-TM des Rotklee, Schnitt 1 bis 3 und Stoppel in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Rotklee Schnitt 1 [dt ha ⁻¹]		Rotklee Schnitt 2 [dt ha ⁻¹]		Rotklee Schnitt 3 [dt ha ⁻¹]		Rotklee Stoppel [dt ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	39,6 ±3,3 a	27,9 ±2,5 b	41,2 ±2,7 a	33,4 ±1,7 a	22,7 ±1,2 b	21,2 ±0,6 b	7,2 ±1,1 a	11,0 ±0,4 a
Kalk	45,8 ±1,8 a	27,3 ±3,2 b	41,7 ±3,7 a	32,7 ±0,5 a	24,9 ±0,6 ab	24,3 ±1,2 ab	6,1 ±0,4 a	11,8 ±0,1 a
Mineral	46,3 ±1,0 a	30,4 ±1,7 ab	39,1 ±2,7 a	30,1 ±2,7 a	27,0 ±1,5 ab	26,5 ±1,2 a	7,0 ±0,6 a	10,8 ±0,9 a
Grüngutkompost	47,6 ±4,7 a	39,2 ±0,7 a	38,9 ±2,5 a	34,7 ±2,6 a	26,3 ±1,2 ab	24,3 ±1,2 ab	7,1 ±0,4 a	11,1 ±0,7 a
Pferdemist	52,5 ±1,9 a	28,6 ±2,3 b	40,1 ±1,9 a	32,9 ±0,8 a	29,2 ±2,8 a	25,7 ±1,1 ab	7,4 ±0,2 a	11,2 ±0,6 a
Gehölzhäcksel	49,9 ±4,7 a	25,7 ±1,4 b	36,2±5,2 a	30,9±1,1 a	28,1 ±0,6 ab	27,5 ±1,2 a	7,6 ±0,6 a	11,6 ±0,9 a
Mittelwert ± Standardfehler des Mittelwertes, Tukey-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	B	A	A	B	A
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,0248		0,9110		0,7567		0,6601	

Tab. A 39: Spross-N der Ackerbohne (Korn und Stroh) und des Spitzwegerich sowie Entzug von Stickstoff aus dem Boden und symbiotische N₂-Fixierung der Ackerbohne in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Spross-N Ackerbohne [kg ha ⁻¹]		Spross-N Spitzwegerich [kg ha ⁻¹]		N _{Boden} Ackerbohne [kg ha ⁻¹]		N _{fix} Ackerbohne* [kg ha ⁻¹]	
	2009 ^S	2010	2009	2010	2009 ^S	2010	2009 ^S	2010
Kontrolle	216,0 ±26 ab	139,7 ±7 a	77,7 ± 7 b	70,9 ±7 a	62,6 ±20 a	30,7 ±3 ab	153,4 ±13 a	109,1 ±5 a
Kalk	230,9 ±5 ab	141,1 ±11 a	92,3 ±10 ab	77,1 ±7 a	69,2 ±2 a	31,9 ±5 ab	161,6 ±7 a	109,2 ±7 a
Mineral	242,3 ±13 ab	129,1 ±11 a	103,3 ±14 ab	64,0 ±18 a	56,7 ±2 a	21,3 ±4 b	185,6 ±12 a	107,8 ±9 a
Grüngut- kompost	239,9 ±18 ab	140,2 ±5 a	90,2 ±7 ab	74,1 ±11 a	69,5 ±10 a	33,7 ±1 a	170,4 ±16 a	106,5 ±4 a
Pferdemist	204,5 ±11 b	140,5 ±4 a	115,1 ±14 a	83,4 ±4 a	50,8 ±3 a	29,5 ±4 ab	153,7 ±9 a	111,0 ±2 a
Gehölzhäcksel	270,9 ±17 a	136,9 ±9 a	94,1 ±10 ab	59,6 ±12 a	71,3 ±7 a	27,5 ±3 ab	199,9 ±10 a	109,5 ±6 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, * ¹⁵ N-Methode, ^S Scheffè-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, P-Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	A	A	B	A	B
P- Wert Düngung × Jahr	0,0961 ^S		0,4743		0,6559		0,11462 ^S	

Tab. A 40: Spross-N von Rotklee (3 Schnitte + Stoppel) und von Welschem Weidelgras (3 Schnitte) sowie Entzug von Stickstoff aus dem Boden und symbiotische N₂-Fixierung von Rotklee in Abhängigkeit der Düngung in den Jahren 2009 und 2010

Prüfglieder	Spross-N Rotklee [kg ha ⁻¹]		Spross-N Weidelgras [kg ha ⁻¹]		N _{Boden} Rotklee [kg ha ⁻¹]		N _{fix} Rotklee* [kg ha ⁻¹]	
	2009	2010	2009	2010	2009 ^S	2010	2009 ^S	2010
Kontrolle	304,2 ±7 b	252,9 ±13 a	86,4 ±8 b	54,9 ±5 bc	67,6 ±10 a	52,8 ±6 a	237,4 ±2 a	200,1 ±10 a
Kalk	333,5 ±7 ab	265,4 ±7 a	87,7 ±4 ab	70,8 ±13 abc	75,1 ±10 a	63,1 ±3 a	258,5 ±16 a	202,3 ±6 a
Mineral	360,3 ±4 ab	282,6 ±11 a	85,0 ±6 b	49,2 ±8 c	89,3 ±2 a	60,8 ±2 a	271,0 ±3 a	221,8 ±9 a
Grüngutkompost	325,5 ±18 ab	290,4 ±3 a	113,7 ±3 ab	90,1 ±7 ab	70,0 ±5 a	71,2 ±7 a	255,5 ±14 a	219,2 ±5 a
Pferdemist	367,8 ±12 a	271,6 ±7 a	117,9 ±12 a	94,3 ±10 a	90,7 ±5 a	66,8 ±7 a	277,0 ±11 a	204,8 ±4 a
Gehölzhäcksel	324,7 ±34 ab	257,2 ±9 a	90,1 ±2 ab	52,8 ±10 bc	65,3 ±10 a	49,1 ±4 a	259,4 ±24 a	208,1 ±10 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, * ¹⁵ N-Methode, ^S Scheffè-Test								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, P-Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	B	A	B	A	B
P-Wert Düngung × Jahr	0,1522		0,7798		0,2939 ^S		0,5116 ^S	

Tab. A 41: Korn- und Stroh-TM, sowie Bestandesdichte und Tausendkornmasse des Winterweizens nach Vorfrucht Ackerbohne

Prüfglieder	Korn Winterweizen [dt ha ⁻¹]		Stroh Winterweizen [dt ha ⁻¹]		Bestandesdichte [Ähren m ⁻²]		Tausendkornmasse [g]	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
Kontrolle	32,7 ±2,8 b	24,9 ±2,1 a	30,2 ±0,9 a	17,9 ±1,8 a	355 ±19 a	208 ±13 a	42,1 ±0,9 a	45,9 ±1,0 a
Kalk	33,9 ±3,1 b	23,7 ±1,7 a	29,1 ±1,4 a	16,6 ±1,1 a	318 ±30 a	238 ±15 a	44,4 ±0,2 a	44,4 ±0,7 a
Mineral	36,6 ±1,7 b	26,3 ±2,5 a	30,7 ±2,0 a	18,0 ±2,1 a	354 ±4 a	248 ±18 a	43,7 ±0,4 a	47,0 ±0,4 a
Grüngutkompost	46,1 ±1,0 a	27,7 ±1,4 a	34,2 ±1,5 a	25,2 ±3,9 a	412 ±15 a	254 ±2 a	44,6 ±0,6 a	46,8 ±0,7 a
Pferdemist	37,9 ±3,2 b	25,3 ±0,9 a	28,9 ±2,4 a	18,4 ±0,4 a	357 ±12 a	244 ±10 a	44,2 ±0,4 a	46,9 ±0,5 a
Gehölzhäcksel	39,0 ±1,8 ab	29,0 ±5,3 a	29,5 ±1,7 a	17,5 ±2,5 a	361 ±15 a	251 ±7 a	43,8 ±0,7 a	46,4 ±0,6 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, * 3 Wiederholungen ausgewertet								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	A	A	B	A	B	A	A
<i>P</i> -Wert Düngung × Jahr	0,0974		0,9509		0,2395		0,2744	

Tab. A 42: Korn- und Stroh-TM, sowie Bestandesdichte und Tausendkornmasse des Winterweizens nach Vorfrucht Rotklee in den Jahren 2010 und 2011

Prüfglieder	Korn Winterweizen [dt ha ⁻¹]		Stroh Winterweizen [dt ha ⁻¹]		Bestandesdichte [Ähren m ⁻²]		Tausendkornmasse [g]	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
Kontrolle	30,5 ±3,9 a	34,5 ±2,4 a	29,2 ±2,1 ab	28,5 ±3,9 a	374 ±12 a	283 ±27 a	42,1 ±0,6 a	45,6 ±1,2 a
Kalk	32,5 ±3,5 a	30,0 ±3,5 a	30,4 ±0,7 ab	24,5 ±1,8 a	365 ±26 a	312 ±8 a	42,4 ±0,2 a	45,4 ±0,7 a
Mineral	33,9 ±1,8 a	31,1 ±3,7 a	28,7 ±1,1 b	25,3 ±2,1 a	343 ±8 a	300 ±21 a	41,4 ±0,8 a	46,2 ±0,7 a
Grüngutkompost	38,3 ±1,8 a	31,8 ±2,3 a	34,5 ±0,5 ab	31,0 ±3,5 a	380 ±16 a	315 ±12 a	41,1 ±0,7 a	46,5 ±0,3 a
Pferdemist	37,5 ±4,0 a	36,4 ±1,5 a	35,5 ±1,2 a	26,1 ±2,0 a	411 ±27 a	353 ±7 a	43,0 ±0,5 a	45,8 ±0,6 a
Gehölzhäcksel	35,1 ±2,4 a	32,0 ±0,9 a	32,3 ±1,5 ab	21,2 ±2,1 a	395 ±31 a	273 ±17 a	42,6 ±0,6 a	45,7 ±0,1 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test, * 3 Wiederholungen ausgewertet								
zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	A	A	B	A	B	A	B
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,1485		0,4761		0,4734		0,4639	

Tab. A 43: N-Entzug mit dem Korn und dem Stroh des Winterweizens nach Vorfrucht Ackerbohne und Rotklee
in den Jahren 2010 und 2011

Prüfglieder	Vorfrucht Ackerbohne				Vorfrucht Rotklee			
	Korn-N Winterweizen [kg ha ⁻¹]		Stroh-N Winterweizen [kg ha ⁻¹]		Korn-N Winterweizen [kg ha ⁻¹]		Stroh-N Winterweizen [kg ha ⁻¹]	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
Kontrolle	56,6 ±4,3 b	31,9 ±4,5 a	8,6 ±0,5 a	5,5 ±0,6 a	30,5 ±3,9 a	42,5 ±7,2 a	8,3 ±1,0 b	9,2 ±1,3 a
Kalk	59,5 ±6,2 b	30,3 ±3,4 a	8,8 ±0,3 a	5,3 ±0,7 a	32,5 ±3,5 a	39,3 ±7,5 a	10,0 ±0,2 ab	8,4 ±0,9 a
Mineral	63,5 ±2,8 b	32,4 ±9,8 a	8,7 ±0,3 a	5,6 ±0,8 a	33,9 ±1,8 a	38,4 ±7,9 a	10,2 ±0,2 ab	8,4 ±1,5 a
Grüngutkompost	83,8 ±3,0 a	37,5 ±2,5 a	11,1 ±0,7 a	8,5 ±1,5 a	38,3 ±1,7 a	48,4 ±3,3 a	12,2 ±0,1 a	10,2 ±2,0 a
Pferdemist	66,8 ±5,8 b	33,3 ±2,8 a	9,4 ±0,8 a	6,3 ±0,2 a	37,5 ±2,0 a	45,6 ±8,0 a	11,4 ±0,9 a	8,0 ±1,2 a
Gehölzhäcksel	66,6 ±3,0 b	35,8 ±8,2 a	8,9 ±0,8 a	5,3 ±0,9 a	35,1 ±1,9 a	45,2 ±2,0 a	9,8 ±0,3 ab	5,9 ±0,8 a
Mittelwert ± Standardfehler, Tukey-Test								
Zweifaktorielle Auswertung Düngung × Jahr ↓, <i>P</i> -Werte aus F-Test								
Jahr	A	B	A	B	A	A	A	B
<i>P</i> - Wert Düngung × Jahr	0,1537		0,9848		0,9620		0,3277	

Tab. A 44: Bodenatmung unter Rotklee [$\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{CO}_2$] zu acht Terminen im Jahr 2011 und zu 15 Terminen im Jahr 2012

Prüfglieder	Messtermine 2011							
	06.05.2011	10.05.2011	19.05.2011	26.05.2011	10.06.2011	15.09.2011	23.09.2011	06.10.2011
Kontrolle	491,5 ±90	598,9 ±120	636,1 ±107	724,0 ±113	453,9 ±31	518,1 ±28	543,8 ±43	541,9 ±41
Stroh	792,9 ±172	729,2 ±62	725,6 ±122	808,0 ±111	553,7 ±42	649,6 ±79	613,5 ±24	519,0 ±26
<i>P</i> -Wert Düngung	0,1835	0,4008	0,6490	0,7283	0,0180	0,1805	0,3316	0,7307

	Messtermine 2012							
	10.04.2012	18.04.2012	24.04.2012	02.05.2012	08.05.2012	14.05.2012	21.05.2012	30.05.2012
Kontrolle	271,6 ±30	234,2 ±44	240,5 ±30	642,0 ± 61	615,9 ±74	508,2 ±34	526,4 ±32	509,0 ±16
Stroh	295,4 ±43	205,8 ±34	288,1 ±42	678,2 ±62	641,7 ±35	554,8 ±47	495,0 ±42	514,5 ±42
<i>P</i> -Wert Düngung	0,5284	0,7311	0,2328	0,3257	0,6432	0,2638	0,0823	0,8818

	12.06.2012	19.06.2012	02.07.2012	17.08.2012	23.08.2012	28.08.2012	16.10.2012
Kontrolle	738,4 ±41	619,6 ±9	805,0 ±41 a	448,0 ±19 a	823,0 ±91	553,5 ±34	282,9 ±18
Stroh	810,1 ±70	634,8 ±30	930,0 ±35 b	476,5 ±25 b	823,5 ±54	563,5 ±28	295,3 ±20
<i>P</i> -Wert Düngung	0,1064	0,6936	0,0354	0,0305	0,9915	0,3020	0,4591

Tab. A 45: Ergebnis des zweifaktoriellen Mittelwertvergleiches zum Einfluss der Strohdüngung und des Schnitttermines auf den Schnittgutertrag des Rotklees

Mittel Düngung			Mittel Schnitttermine	
Schnitt 1	b		Kontrolle	b
Schnitt 2	ab		Stroh nicht markiert	a
Schnitt 3	ab		Stroh ¹⁵ N-markiert	a
Schnitt 4	a			
Schnitt 5	b			
Schnitt 6	ab			
P-Wert	0,0220		0,0004	
P-Wert Schnitt × Düngung		0,9370		

Tukey-Test, $\alpha < 0,05$; n = 5

Tab. A 46: Ergebnis des zweifaktoriellen Mittelwertvergleiches der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (‰) im Spross des Rotklees in Abhängigkeit von der Düngung und dem Schnitttermin

Schnitt-Nr.	Tage nach Saat	Prüfglieder		
		ohne Strohzugabe	Stroh nicht ¹⁵ N-markiert	Stroh ¹⁵ N-markiert
1	70	bc*	c*	a
2	92	bc*	c*	a
3	118	b*	b*	a
4	145	bc*	c*	a
5	175	c**	b*	a
6	222	c**	b*	a

Friedmann-Test: * $\alpha < 0,05$ ** $\alpha < 0,01$; n = 5, → Leserichtung

Tab. A 47: Ergebnisse des Mittelwertvergleiches der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Schnittgut des Rotklee nach Düngung mit nicht ^{13}C -markiertem und ^{13}C -markiertem Stroh im Freiland im Jahr 2011 und 2012

Schnitt-Nr. 2011	Prüfglieder		
	ohne Stroh	Stroh nicht ^{13}C -markiert	Stroh ^{13}C -markiert
1	b	b	a
2	b	b	a
3	b	b	a
4	b	b	a
2012			
1	b	b	a
2	b	b	a
3	b	b	a
4	b	b	a

Tukey- Test, $\alpha < 0,001$; Leserichtung \rightarrow

Tab. A 48: N-Entzug der Referenzkulturen Welsches Weidelgras (Saatplatterbse 2008 und 2009), Spitzwegerich (Ackerbohne 2009 und 2010) und Welsches Weidelgras (Rotklee 2009 und 2010) in Abhängigkeit der Düngung

Düngung	Weidelgras [kg ha ⁻¹ N]		Spitzwegerich [kg ha ⁻¹ N]		Weidelgras * [kg ha ⁻¹ N]	
	2008	2009	2009	2010	2009	2010
Kontrolle	53 a	29 b	78 b	71 a	86 b	55 bc
Kalk	59 a	28 b	92 ab	77 a	88 ab	71 abc
Mineral	53 a	33 b	103 ab	64 a	85 b	49 c
Kompost	54 a	30 b	90 ab	74 a	114 ab	90 ab
Pf.-Mist	59 a	60 a	115 a	83 a	118 a	94 a
Stroh ¹ / Häcksel ²	51 a ¹	43 ab ¹	94 ab ²	60 a ²	90 ab ²	53 bc ²
Tage nach Düngung	96	98	152	144	100-196*	102-200*

* Mischprobe der Einzelernten (3 Schnitttermine)

Erklärung

Ich versichere, dass ich die beiliegende Dissertation selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe. Ich versichere außerdem, dass ich die vorliegende Arbeit erstmalig und nur an der Humboldt-Universität zu Berlin eingereicht habe.

Berlin, den 09.04.2015

Guido Lux

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines breit angelegten Forschungsprojektes mit dem Schwerpunkt der Optimierung des Managements der Bodenfruchtbarkeit vor dem Hintergrund des Anbaus von Leguminosen im ökologischen Landbau, welches vom Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung im Rahmen des Bundesprogramms ökologischer Landbau gefördert wurde.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Knut Schmidtke, Professor an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, für die Überlassung des Themas, der wissenschaftlichen Betreuung, den zahlreichen richtungsweisenden Gesprächen und den kritischen Hinweisen während der Erstellung der Arbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen in meine Arbeit und die persönliche Unterstützung während der Zeit unserer Zusammenarbeit.

Weiterhin möchte ich mich bedanken bei Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Frank Ellmer für die Übernahme der externen Promotion an der Humboldt-Universität zu Berlin, die kritische Hinterfragung inhaltlicher Schwerpunkte und fachlicher Besonderheiten der schriftlichen Arbeit.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Heinrich W. Scherer von der Rheinischen Friedrich Wilhelms-Universität in Bonn für die Übernahme des dritten Gutachtens.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Nusche von der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft in Nossen für die zahllosen Analysen meiner Boden- und Pflanzenproben.

Einige meiner Kollegen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für technische Hilfestellungen möchte ich mich bei Herrn Sieghart Haedicke bedanken und für labortechnische Hilfe und Tipps bei Frau Reingard Müller. Für die nicht zu unterschätzende Wirkung der motivierenden und unterstützenden Gespräche, sowie formaler und inhaltlicher Diskussion während der Zeit der Fertigstellung der Arbeit bedanke ich mich bei Frau Maren Bresan, Herrn Torsten Mick und Frau Anke Landgraf.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Katrin, ohne deren Geduld, Verständnis und Ermutigung über einen langen Zeitraum diese Arbeit nicht vollendet worden wäre.